Niveau(x) d'enseignement : 4 Numéro EDUQ : 9470287
Centre d'intérêt : 842

Legendre-Bergeron, Marie-Françoise

Etude du développement d'une compréhension qualitative de l'effet d'une force sur un mobile dans le contexte d'un micromonde de mouvement / Marie-Françoise Legendre-Bergeron. -- Montréal : Université de Montréal, Faculté des sciences de l'éducation, Vice-décanat aux études supérieures et à la recherche, 1993.
333 p. : ill. ; 22 cm. -- (Rapports de recherche / Université de Montréal, Faculté des sciences de l'éducation ; 41) -- (Les Publications de la Faculté des sciences de l'éducation)

Résumé : p. 7 Bibliogr. : p. 291-303.

ISBN 2-920298-82-8

Vedette(s)-secondaire(s) : Université de Montréal. Faculté des sciences de l'éducation. Vice-décanat aux études supérieures et à la recherche

Descripteur(s) : Physique * Activité d'apprentissage * Psychologie cognitive * Application pédagogique de l'ordinateur * Intelligence artificielle * Analyse de tâches * Secondaire (Ordre d'enseignement)

Identificateur(s) de sujet : Micromonde * Constructivisme

Cette thèse présente la conception et l'analyse d'une activité d'apprentissage en physique. L'activité proposée a pour but de faciliter le développement d'une compréhension qualitative de l'effet d'une force sur un mobile, à travers l'exploration d'un micromonde de mouvement. Elle se situe dans le contexte général de l'utilisation d'outils d'analyse de tâches scolaires, fondés sur la psychologie cognitive. Elle permet de clarifier, à l'aide d'un exemple dans le domaine de la physique, l'apport des micromondes comme matériaux d'apprentissage, dans le contexte d'un enseignement basé sur une approche constructiviste de la connaissance. Une première analyse, de type théorique, permet de définir un certain nombre de schèmes représentant le contenu et l'organisation des connaissances visées. Une seconde analyse, de nature empirique, effectuée auprès d'étudiants du secondaire, vise à préciser les étapes du processus intervenant dans l'acquisition progressive de chacun des schèmes.

Type de document :

LES PUBLICATIONS DE LA
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION

ÉTUDE DU DÉVELOPPEMENT D'UNE COMPRÉHENSION QUALITATIVE DE L'EFFET D'UNE FORCE SUR UN MOBILE DANS LE CONTEXTE D'UN MICROMONDE DE MOUVEMENT

MARIE-FRANÇOISE LEGENDRE-BERGERON

Université de Montréal
Faculté des sciences de l'éducation
Vice-décanat aux études supérieures et à la recherche

94-70287

LES PUBLICATIONS DE LA
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION

COLLECTION RAPPORTS DE RECHERCHE

ÉTUDE DU DÉVELOPPEMENT D'UNE COMPRÉHENSION QUALITATIVE DE L'EFFET D'UNE FORCE SUR UN MOBILE DANS LE CONTEXTE D'UN MICROMONDE DE MOUVEMENT

MARIE-FRANÇOISE LEGENDRE-BERGERON

Dépôt légal : 4e trimestre 1993
ISBN 2-920298-82-8
Bibliothèque nationale du Canada
Bibliothèque nationale du Québec

Université de Montréal
Faculté des sciences de l'éducation
Vice-décanat aux études supérieures et à la recherche

Comité des publications de la Faculté des sciences de l'éducation
Manuel Crespo, vice-doyen aux études supérieures et à la recherche
André Brassard, président
Colette Dufresne-Tassé
Marie-Christine Paret

Secrétaire administrative : D. Rollande Sabourin

Dactylographie et mise en page : Josée Pasquini

Vice-décanat aux études supérieures et à la recherche
Faculté des sciences de l'éducation
Université de Montréal
C.P. 6128, succursale A
Montréal (Québec)
H3C 3J7

Téléphone : (514) 343-5887
Télécopieur : (514) 343-2283

ÉTUDE DU DÉVELOPPEMENT D'UNE COMPRÉHENSION QUALITATIVE DE L'EFFET D'UNE FORCE SUR UN MOBILE DANS LE CONTEXTE D'UN MICROMONDE DE MOUVEMENT

Marie-Françoise LEGENDRE-BERGERON

REMERCIEMENTS

L'auteure tient à remercier le professeur Benoît Côté, son directeur, pour ses suggestions stimulantes et pour l'intérêt soutenu qu'il a porté à cette recherche ainsi que le professeur Andrée Boisclair, sa co-directrice, pour sa sollicitude, sa grande disponibilité et le support qu'elle lui a constamment manifestés. L'auteure remercie également l'École secondaire Marguerite d'Youville de Ste Foy et, tout particulièrement, la directrice des études, soeur Rachel Thiboutot de même que les étudiantes qui ont participé à cette recherche, pour leur précieuse collaboration et leur intérêt, lors de l'expérimentation. Enfin, l'auteure remercie de tout coeur son mari et ses trois filles qui l'ont accompagnée tout au long de cette grande entreprise.

AVANT-PROPOS

Nous ne pouvons pas simplement "décider" ou "choisir" de réaliser une entreprise nécessitant beaucoup de temps, parce qu'elle provoquera inévitablement des conflits avec d'autres intérêts et d'autres ambitions. Nous devrons alors poser des questions du genre :

Que dois-je sacrifier à cette entreprise ?

Qu'est-ce qu'elle m'apportera ? ...

Mon intérêt pour elle va-t-il durer ? ...

La question la plus difficile de toutes est peut-être : "En quoi serai-je changé par le choix de cet objectif ?" ...

Tant que ces doutes ne seront pas balayés, tous les plans que nous faisons seront remis en cause par le risque que nous "changions d'avis". Mais alors, comment un plan à long terme peut-il être réalisé ? Le moyen le plus simple de "s'auto-commander" consiste à ne faire que ce que l'on est déjà enclin à faire.

Bien des moyens que nous employons pour nous commander sont identiques à ceux que nous apprenons à utiliser pour influencer d'autres gens. Nous nous faisons agir en exploitant nos peurs et nos désirs, en nous offrant des gratifications, ou en agitant la menace de la perte de ce que nous aimons. Mais quand des ruses à court terme ne nous accrochent pas assez longtemps à nos projets, il nous faut trouver un moyen de changer de motivation sans changer d'idée... Pour nous pousser à nous engager dans nos plans les plus importants et les plus ambitieux, nous recourons à des services qui restent actifs pendant des durées correspondantes.

Quels sont, parmi tous nos services, ceux qui changent le plus lentement ? ... Ils doivent inclure les services silencieux et cachés qui façonnent ce que nous appelons le **caractère**. Il s'agit là de systèmes chargés non seulement de ce que **nous voulons**, mais aussi de ce que nous **voulons être**, c'est-à-dire de nos idéaux.

(Minsky, 1988, pp. 72-73)

RÉSUMÉ

Cette thèse présente la conception et l'analyse d'une activité d'apprentissage en physique. L'activité proposée a pour but de faciliter le développement d'une compréhension qualitative de l'effet d'une force sur un mobile, à travers l'exploration d'un micromonde de mouvement. Elle se situe dans le contexte général de l'utilisation d'outils d'analyse de tâches scolaires, fondés sur la psychologie cognitive. La présente recherche permet de clarifier, à l'aide d'un exemple dans le domaine de la physique, l'apport des "micromondes", comme matériaux d'apprentissage, dans le contexte d'un enseignement basé sur une approche constructiviste de la connaissance. Une première analyse, de type théorique, nous amène à définir un certain nombre de "schèmes" permettant de représenter à la fois le contenu et l'organisation des connaissances visées. Une seconde analyse de nature empirique, effectuée auprès d'étudiantes de niveau secondaire, vise à préciser les étapes et processus intervenant dans l'acquisition progressive de chacun des schèmes. Elle nous permet de mieux comprendre comment ces schèmes se construisent à partir des connaissances préalables de l'apprenant et de leur exploration du micromonde, cette exploration étant guidée par un scénario d'intervention, basé sur l'analyse théorique préalable.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS 3

AVANT-PROPOS 5

RÉSUMÉ 7

INTRODUCTION 15

PREMIÈRE PARTIE: CADRE CONCEPTUEL 19

1. Problématique et contexte théorique 21

1.1 Psychologie cognitive et pédagogie 24

1.1.1 Analyse de tâches scolaires 25

1.1.2 Compétence des sujets experts et novices 26

1.1.3 Analyse des représentations initiales de l'apprenant 29

1.1.4 Vers un modèle d'intervention basé sur l'analyse de tâche 32

1.2 L'épistémologie constructiviste de Piaget 35

1.2.1 La théorie de l'équilibration : modèle d'acquisition de connaissances 36

1.2.2 Les implications pédagogiques du modèle de l'équilibration 41

1.3 L'Intelligence Artificielle 49

1.3.1 Quelques problèmes théoriques fondamentaux en Intelligence Artificielle 49

1.3.2 Notion de schème et modèle de la compétence 53

1.4 Notion de micromonde et modèle d'intervention pédagogique 56

1.4.1 Micromondes naturels 57

1.4.2 Micromondes artificiels 58

DEUXIÈME PARTIE : CONCEPTION ET ANALYSE DU MICROMONDE 63

2. Conception d'un micromonde de mouvement 65

2.1 Micromondes et apprentissage de la physique 67

2.1.1 Principaux obstacles à la connaissance physique 67

2.1.2 Des micromondes pour l'apprentissage de la physique 70

2.1.3 Un exemple de micromonde newtonien : la tortue dynamique 72

2.2 Présentation du micromonde 75

2.2.1 Organisation du micromonde 75

2.2.2 Description et fonctionnement de chacun des systèmes 77

2.2.3 Champ conceptuel visé 83

TABLE DES MATIÈRES

3. **Analyse du micromonde** 87
3.1 Description de l'activité 87
3.1.1 Composantes de l'interaction 90
3.1.2 Description de l'interaction en termes d'observables et de coordinations 90
3.2 Représentation de la compétence en termes de schèmes 92
3.2.1 Description de chacun des schèmes 95
3.2.2 Aspects qualitatifs et fonctionnels de la compétence visée 97

TROISIÈME PARTIE : DESCRIPTION DE L'ANALYSE EMPIRIQUE DE LA TÂCHE 120

4. **Définition et organisation de l'étude expérimentale** 125
4.1 Organisation de la recherche 127
4.1.1 Sujets 129
4.1.2 Endroit où s'est déroulée la recherche et durée de celle-ci 129
4.1.3 Déroulement des entrevues 130
4.1.4 Recueil et analyse des données 131
4.2 Description du scénario utilisé 131
4.2.1 Première séance 132
4.2.2 Séances 2 à 5 134
4.2.3 Séances 6 et 7 135
4.3 Description et analyse des données 140
4.3.1 Première étape 141
4.3.2 Deuxième étape 141

QUATRIÈME PARTIE : PRÉSENTATION ET ANALYSE DES DONNÉES 141

5. **Exploration libre** 143
5.1 Description des conduites observées à la séance 1 147
5.1.1 Sujets de secondaire III 149
5.1.2 Sujets de secondaire V 149
5.2 Analyse de la démarche d'exploration des sujets 154

6. **Construction du schème unidimensionnel** 161
6.1 Phase I : Exploration des situations unidimensionnelles 165
6.1.1 Sujets de secondaire III 167
6.1.2 Sujets de secondaire V 167
172

TABLE DES MATIÈRES

6.2 Étapes et processus d'équilibration en jeu dans la construction du schème unidimensionnel 174
6.2.1 Étapes de construction du schème 175
6.2.2 Processus de passage d'une étape à la suivante 176

7. Construction du schème de la moyenne 183
7.1 Phase II : Exploration des changements d'orientation bidimensionnels 185
A. Exploration du système des coups 185
7.1.1 Sujets de secondaire III 185
7.1.2 Sujets de secondaire V 196
B. Exploration du système des flèches 205
7.1.3 Sujets de secondaire III 205
7.1.4 Sujets de secondaire V 208
7.2 Étapes et processus d'équilibration en jeu dans la construction du schème de la moyenne 212
7.2.1 Principales étapes de construction du schème 213
7.2.2 Processus de passage d'une étape à la suivante 214

8. Construction du schème de l'écart 227
8.1 Phase III : Exploration des changements de vitesse bidimensionnelle 229
8.1.1 Sujets de secondaire III 229
8.1.2 Sujets de secondaire V 235
8.2 Étapes et processus d'équilibration en jeu dans la construction du schème de l'écart 242
8.2.1 Principales étapes de construction du schème 242
8.2.2 Processus de passage d'une étape à la suivante 243

9. Résultats de la démarche d'exploration 257
9.1 Description des conduites observées aux séances 6 et 7 259
9.1.1 Sujets de secondaire III 259
9.1.2 Sujets de secondaire V 264

CONCLUSION 275

BIBLIOGRAPHIE 289

ANNEXE 305

Publications de la Faculté des sciences de l'éducation 317

LISTE DES FIGURES

Figure 1 76
Figure 2 77
Figure 3 78
Figure 4 79
Figure 5 79
Figure 6 102
Figure 7 104
Figure 8 105
Figure 9 106
Figure 10 106
Figure 11 110
Figure 12 111
Figure 13 112
Figure 14 113
Figure 15 114
Figure 16 115
Figure 17 116
Figure 18 161
Figure 19 271
Figure 20 273

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Principales relations qualitatives en jeu dans le schème unidimensionnel 98

Tableau 2 Principales relations qualitatives en jeu dans le schème de la moyenne 101

Tableau 3 Principales relations qualitatives en jeu dans le schème de l'écart 109

Tableau 4 Principales étapes de construction du schème unidimensionnel 180

Tableau 5 Principales stratégies observées à la première étape de construction du schème unidimensionnel 181

Tableau 6 Principales stratégies observées à la seconde étape de construction du schème unidimensionnel 182

Tableau 7 Principales étapes de construction du schème de la moyenne 222

Tableau 8 Principales stratégies observées à la première étape de construction du schème de la moyenne 223

Tableau 9 Principales stratégies observées à la seconde étape de construction du schème de la moyenne 224

Tableau 10 Principales stratégies observées à la troisième étape de construction du schème de la moyenne 225

Tableau 11 Principales étapes de construction du schème de l'écart 252

Tableau 12 Principales stratégies observées à la première étape de construction du schème de l'écart 253

Tableau 13 Principales stratégies observées à la seconde étape de construction du schème de l'écart 254

Tableau 14 Principales stratégies observées à la troisième étape de construction du schème de l'écart 255

INTRODUCTION

La présente étude porte sur la conception et l'analyse d'une activité d'apprentissage en physique, visant à développer une compréhension qualitative de l'effet d'une force sur un mobile. Cette activité est basée sur l'exploration d'un micromonde de mouvement, c'est-à-dire sur l'interaction avec un environnement d'apprentissage utilisant l'ordinateur dans une perspective pédagogique particulière. Notre approche se situe dans le contexte de travaux utilisant certains outils conceptuels développés par l'intelligence artificielle dans l'élaboration de "matériaux" d'apprentissage basés sur une perspective épistémologique constructiviste. La problématique générale à laquelle la présente recherche se rattache a trait aux possibilités d'intégrer à la pédagogie une perspective épistémologique reposant sur un modèle constructiviste de l'acquisition de connaissances. Cette intégration va se refléter principalement dans notre utilisation de la notion de micromonde ainsi que dans notre modèle d'analyse de tâche.

Point de rencontre opérationnel entre la perspective épistémologique de Piaget et certains travaux en intelligence artificielle (diSessa, 1986; Lawler, 1985; Minsky, 1988; Papert, 1980), la notion de micromonde est reliée à une certaine conception de l'utilisation de l'ordinateur à des fins pédagogiques : l'ordinateur est un outil pour concevoir des matériaux d'enseignement aptes à faciliter l'apprentissage tout en respectant le caractère "auto-constructeur" de la connaissance (Lawler, 1982; Lawler et Yazdani, 1986). Dans cette perspective, on tente de tenir compte de la nature et de la complexité des connaissances et processus de pensée dont dispose l'apprenant et d'établir un pont entre les connaissances préalables de celui-ci et celles que l'on a pour but de lui faire acquérir.

La conception de micromondes comme outils d'intervention pédagogique s'appuyant sur une perspective épistémologique constructiviste constitue une approche relativement nouvelle en éducation. Il existe donc assez peu d'études (diSessa, 1977, 1986, 1987; Lawler, 1985; Papert, 1980; White, 1983 et 1984; White et Horwitz, 1988) sur l'analyse de tâches ou d'activités d'apprentissage conçues dans cette perspective et sur la forme que peut prendre l'intervention dans ce contexte. La recherche que nous avons effectuée a précisément pour but de clarifier, à l'aide d'un exemple dans le domaine de la physique, l'apport des micromondes, comme matériaux d'apprentissage,

dans le contexte d'un enseignement basé sur une vision constructiviste de la connaissance et sur une conception interactive de l'apprentissage découlant de la théorie de l'équilibration de Piaget. Notre objectif n'est pas d'élaborer une méthode d'enseignement, mais de préciser la nature des connaissances pouvant être acquises dans ce contexte et d'analyser les processus interactifs et constructifs intervenant dans l'acquisition progressive de ces connaissances, au contact du micromonde.

La présente recherche apporte une contribution à différents niveaux:

- au niveau de la conception et de l'analyse de situations d'apprentissage scolaire, puisqu'elle vise à développer, à partir de la théorie de Piaget et de certains travaux en intelligence artificielle, des outils d'analyse épistémologiques applicables au contexte de l'enseignement;

- au niveau des applications pédagogiques de l'ordinateur dans le contexte de l'enseignement de la physique puisque l'activité conçue a pour but de favoriser le développement d'une compréhension qualitative de certains concepts relatifs aux lois du mouvement. Dans ce but, nos sujets sont invités à participer à une exploration active du mouvement dans un environnement interactif simulant l'absence de friction et de gravité.

Notre démarche comporte essentiellement quatre grandes parties.

La première partie (chapitre 1) présente la problématique générale à laquelle se rattache notre étude. Partant des résultats de quelques recherches dans le domaine de l'analyse de tâches scolaires fondée sur la psychologie cognitive, nous tentons d'identifier un certain nombre d'outils conceptuels que l'épistémologie constructiviste de Piaget, d'une part, et que certains travaux en intelligence artificielle, d'autre part, peuvent apporter à la conception et à l'analyse d'activités d'apprentissage.

La seconde partie (chapitres 2 et 3) porte sur l'utilisation de ces outils conceptuels dans l'élaboration et l'analyse d'un micromonde de mouvements. Nous décrivons le micromonde que nous avons conçu, à partir du programme de la "tortue dynamique" de diSessa, pour faciliter le développement d'une compréhension qualitative de l'effet d'une force sur un mobile (chapitre 2). Nous proposons ensuite une analyse de la tâche. Celle-ci consiste à explorer les effets divers que peuvent produire, sur le mobile, les actions possibles à l'intérieur du micromonde (chapitre 3). Cette analyse théorique, en termes de schèmes, a pour but de fournir une représentation des connaissances

pouvant être acquises, à travers cette activité, sous une forme qui permette éventuellement d'en faciliter l'acquisition.

Dans la troisième partie (chapitre 4), nous décrivons comment notre micromonde, en tant qu'environnement d'apprentissage, a été utilisé dans le contexte d'une étude expérimentale effectuée auprès d'étudiantes de niveaux secondaire III et secondaire V. Par la suite, nous présentons le scénario d'intervention utilisé. L'étude expérimentale a pour but de compléter et d'enrichir l'analyse théorique en permettant de préciser la nature des connaissances acquises par les sujets, dans ce contexte, et la façon dont ces connaissances se construisent à partir des représentations préalables de l'apprenant.

Enfin, la quatrième partie (chapitres 5 à 9) est consacrée à la description et à l'interprétation des conduites observées, dans chacun des deux groupes (secondaire III et secondaire V), aux différentes phases d'exploration prévues dans le scénario d'intervention. L'analyse des données recueillies nous permet de préciser les étapes et processus intervenant dans l'acquisition progressive de la compétence visée, à partir des connaissances préalables de l'apprenant et de ses interactions avec différents types de situations et divers problèmes à résoudre, à l'intérieur du micromonde.

Dans la conclusion, nous tentons de situer notre démarche à l'intérieur d'une perspective pédagogique plus large, en montrant comment l'analyse proposée précédemment peut contribuer à clarifier la nature des connaissances et habiletés impliquées dans la formation de concepts et la façon dont on peut intervenir pour en faciliter la construction. Nous essayons également de préciser le rôle de l'enseignant dans le processus d'équilibration lié à l'apprentissage.

PREMIÈRE PARTIE

CADRE CONCEPTUEL

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET CONTEXTE THÉORIQUE

Il existe une question plus importante que la vérité de la théorie énoncée par Piaget; c'est celle de sa nécessité... Peut-être est-elle trop vaste. Mais on pourrait la reformuler comme suit : si, par je ne sais quel malheur, cette théorie se révélait fausse, quelle serait la prochaine étape ? Je pense même que je pourrais anticiper la réponse : ce serait l'établissement d'une nouvelle théorie de l'équilibration.

Le problème central et le plus général de cette théorie est celui de l'interaction des structures internes. Il est évident, à moins d'être préformiste, que l'intelligence se compose d'éléments venus de l'extérieur du sujet. Il faut que quelque chose entre en moi. Si, en outre, ce quelque chose ne s'entasse pas à l'intérieur comme des briques pour les murs d'une maison, il faut bien que quelque chose se passe avec les éléments venus du dehors. On pourrait peut-être appeler cela l'activité des structures..., à savoir qu'il faut bien que les choses en construction dans la tête aient une activité entre elles qui en fait une sorte d'êtres construits, ou plus exactement auto-construits. Or, c'est cette activité d'interaction entre les éléments intériorisés qui forme le sujet même de cette théorie de la fabrication de l'intelligence. C'est là le thème central de la théorie de l'équilibration: quelles sont les lois d'interaction des objets intériorisés ?

(Papert dans Piaget et al., 1976, pp. 50 et 51)

Le premier chapitre présente la problématique de notre recherche et expose le cadre conceptuel général qui nous a inspirée. Dans la première section, nous passons en revue un certain nombre de recherches dans le domaine de l'analyse de tâches scolaires fondées sur la psychologie cognitive. Ces recherches montrent l'importance de tenir compte des représentations initiales de l'apprenant, dans l'analyse de la compétence, et amènent à définir cette dernière comme le résultat d'une construction progressive conduisant d'un état initial naïf ou novice à un état expert. Ce dernier présente certaines caractéristiques au niveau de l'organisation même des connaissances impliquées.

La seconde section fournit une présentation de la théorie de l'équilibration de Piaget, en tant que modèle de construction des connaissances. Tout en montrant les limites de ce modèle, pour l'analyse de la compétence, nous en dégageons les implications pédagogiques, particulièrement en ce qui a trait aux processus interactifs et constructifs pouvant être impliqués dans l'acquisition progressive de la compétence.

Dans la troisième section, nous introduisons un modèle de représentation des connaissances, la théorie des schèmes, fourni par certains travaux en intelligence

artificielle. Nous tentons alors de montrer en quoi un tel modèle peut contribuer à préciser et à enrichir la perspective épistémologique constructiviste de Piaget.

Enfin, la quatrième et dernière section porte sur la notion de micromonde qui se rattache à une conception interactive et constructive de l'apprentissage. Nous essayons de définir l'apport des micromondes dans la conception d'environnements d'apprentissage interactifs, aptes à faciliter l'acquisition de connaissances scientifiques à partir des représentations intuitives de l'apprenant.

1.1 Psychologie cognitive et pédagogie

L'un des principaux objets de réflexion de la pédagogie est de déterminer les objectifs vers lesquels devra s'orienter l'activité éducative et de préciser la nature des moyens qu'il convient de mettre en oeuvre pour atteindre ces objectifs. Or, le choix d'objectifs pédagogiques et la conception d'outils d'intervention dépendent largement des conceptions implicites ou explicites que nous nous faisons des connaissances et de leur mode de construction ou d'acquisition. La "transmission" d'un savoir, quel qu'il soit, est simultanément reliée à la nature de ce savoir, aux connaissances préalables nécessaires à son assimiliation et aux processus impliqués dans la compréhension et l'acquisition de connaissances. La pédagogie soulève, à cet égard, trois grandes questions fondamentales.

(1) Quelle est la nature des connaissances que l'on a pour but de transmettre ?

(2) Que signifie apprendre ou assimiler une connaissance ?

(3) Que signifie transmettre ou faciliter l'acquisition d'une connaissance ?

La première de ces questions renvoie au problème de la compétence visée et à la nécessité de décrire avec précision en quoi consiste cette dernière.

La seconde est relative aux conditions d'apprentissage ou aux processus impliqués dans l'acquisition de la compétence visée :

(a) qu'est-ce qui fait qu'un concept, une notion, une stratégie peuvent s'apprendre ?

(b) quelles sont les connaissances et habiletés préalables auxquelles fait appel l'acquisition d'une compétence donnée chez l'apprenant ?

(c) quels sont les obstacles qui empêchent ou retardent un apprentissage et quels sont les facteurs qui, au contraire, rendent possible ou peuvent faciliter l'acquisition de certaines connaissances ?

Enfin, la troisième question soulève le problème crucial de l'intervention pédagogique, c'est-à-dire de la nature des moyens de transmission utilisés, ces derniers devant être appropriés d'une part aux types de connaissances que l'on veut enseigner, d'autre part à ce que représente pour l'apprenant l'acquisition de ces connaissances.

Ces questions renvoient à des préoccupations d'ordre aussi bien épistémologique et psychologique que pédagogique. Aussi, la pédagogie est-elle tributaire des types de réponses que l'on apporte à ces questions et par conséquent des outils, tant conceptuels que méthodologiques, dont on dispose pour y répondre. Plusieurs chercheurs (Bergeron et Herscovics, 1984; diSessa, 1977; Glaser, 1978; Groën et Kieran, 1983; Inhelder et al., 1974; Lawler, 1985; Papert, 1980; Resnick, 1984; Vergnaud 1983; von Glasersfeld 1983; Yazdani et Lawler, 1986, etc...) soulignent en effet la pertinence si ce n'est la nécessité de développer des outils conceptuels qui permettent d'intégrer les différentes dimensions précédemment identifiées.

L'un des principaux domaines, qui a largement contribué à clarifier ces questions, est celui de l'analyse de tâches scolaires. Ce domaine utilise les outils conceptuels développés par la psychologie cognitive, l'intelligence artificielle et la psychologie du développement pour analyser différents aspects de l'apprentissage scolaire et de l'enseignement. L'une des notions-clés reliées à ce type d'analyse est celle de la compétence associée à des tâches relativement complexes. L'analyse de tâche constitue un moyen pour identifier les objectifs de l'enseignement et faciliter éventuellement l'apprentissage (Smith, 1987a). Il s'agit, en quelque sorte, d'élaborer un modèle d'apprentissage des contenus enseignés, cette information pouvant éventuellement guider l'intervention pédagogique en aidant les enseignants à mieux comprendre comment les élèves réagissent à leur enseignement (Côté, 1981).

1.1.1 Analyse de tâches scolaires

Depuis les travaux de Gagné (1962, 1968), qui fut l'un des premiers chercheurs à élaborer un modèle d'analyse de tâche (l'analyse hiérarchique) applicable dans le contexte scolaire, ce domaine de recherches a pris une expansion considérable sous

l'influence des théories du traitement de l'information et de certains travaux en intelligence artificielle. Les premiers travaux de psychologie cognitive, basés sur les théories du traitement de l'information, cherchaient d'une part à identifier des processus généraux de résolution de problème, tels que l'analyse moyens-fins, la planification, la division en sous-objectifs, etc... (Newell et Simon, 1967) et, d'autre part à décrire des mécanismes de raisonnement relativement indépendants des contenus. Les recherches plus récentes ont mis davantage l'accent sur la nécessisté de posséder une grande quantité de connaissances spécifiques à un domaine pour être en mesure de résoudre des problèmes ou de raisonner sur une situation. Les travaux des demières années, notamment dans les domaines scientifiques, ont montré l'existence d'une forte interaction entre les processus cognitifs généraux et les structures de connaissances spécifiques à un domaine (Glaser, 1985; Glaser, 1987; Minsky et Papert, 1972; Ramsden, 1988, Resnick, 1987). La plupart des chercheurs reconnaissent l'importance de certaines habiletés générales telles que les capacités métacognitives d'autorégulation, d'analyse des résultats de sa propre de démarche, de planification de son temps et de ses ressources cognitives, etc... (Chipman, Segal et Glaser, 1985; Resnick, 1987; Tuma et Reif, 1980; Weinert et Kluwe, 1987). La question demeure cependant posée de savoir dans quelle mesure ces habiletés peuvent être développées indépendamment de l'apprentissage de contenus ou de domaines de connaissances spécifiques. Selon Glaser (1984), de telles habiletés ne constituent qu'une petite partie de la performance intelligente et sont davantage susceptibles de se développer à travers l'enseignement de connaissances spécifiques, sous une forme interactive et interrogative qui amène les gens à comprendre ce qui est nouveau à la lumière de leurs connaissances préalables. Plusieurs autres auteurs (Biggs, 1986; Minsky et Papert, 1972; Marton et Ramsden, 1988) ont exprimé des vues similaires. Les habiletés de pensée ne constituent pas des entités séparées, mais sont étroitement reliées aux contenus auxquels elles s'appliquent. L'accent doit donc être mis sur l'acquisition de contenus de connaissances spécifiques et sur le fait que l'on ne peut enseigner à raisonner correctement indépendemment du contenu ou de la matière de l'enseignement. Ainsi, la compétence ne se réduit pas à quelques processus cognitifs généraux. Elle implique également un vaste répertoire de connaissances et doit être envisagée en rapport avec des contenus de connaissances spécifiques, comme ceux, par exemple, qui font l'objet de l'enseignement scolaire.

1.1.2 Compétence des sujets experts et novices

Les études sur les caractéristiques qui différencient la performance des sujets experts de celle des sujets naïfs ou novices, notamment dans les domaines scientifiques, ont joué un rôle particulièrement central dans l'analyse de la compétence. Elles

ont permis de mettre en évidence tout un ensemble de caractéristiques telles que l'organisation des connaissances, la représentation du problème, les processus de décodage de l'information, les habiletés métacognitives d'autorégulation des processus de pensée, etc., qui distinguent à la fois la nature des connaissances et les processus de raisonnement utilisés par les sujets en fonction de leur niveau de compétence.

Chi et Glaser (1982), qui ont étudié la résolution de problèmes de physique, se sont demandés dans quelle mesure l'organisation des connaissances de base pouvait contribuer à rendre compte des modes de pensée observés chez les sujets experts et novices. Selon ces auteurs, la relation entre les structures de connaissance de base et les processus de résolution de problème est "médiatisée" par la qualité de la représentation du problème construite par celui qui résout le problème. Cette représentation du problème serait déterminée à la fois par la nature des connaissances dont dispose le sujet et par la façon dont ces connaissances sont organisées. Les connaissances du sujet novice seraient organisées sur la base des données concrètes explicitement présentées dans le problème. Les connaissances de l'expert, par contre, seraient organisées autour d'un certain nombre de principes implicites qui ne sont pas apparents dans les données du problème, mais dérivent des connaissances préalables du sujet. Les difficultés rencontrées par les sujets novices, dans la résolution de problèmes, seraient moins liées à des limites dans leur capacité d'utiliser certains processus généraux de résolution de problème que dans l'inadéquation de leurs connaissances de base.

Ces structures de connaissances seraient également responsables de différences importantes dans la façon de catégoriser divers problèmes de physique chez les sujets novices et chez les sujets experts (Chi, Feltovitch et Glaser, 1982). Alors que les premiers classent les problèmes à un niveau de surface, en fonction des propriétés physiques de la situation, les seconds regroupent les problèmes en fonction des principes physiques qui s'y appliquent. Les sujets experts saisissent donc davantage d'informations, dans les données d'un problème, que les sujets novices parce qu'ils disposent d'une grande quantité de connaissances implicites qui leur permettent de faire des inférences à partir des données décrites dans le problème. Ces auteurs considèrent qu'une part importante de la compétence de l'expert réside ainsi dans l'habileté à établir rapidement des correspondances entre les évènements extérieurs présents et des modèles internes de ces évènements. Cette habileté à catégoriser rapidement les problèmes suggère l'existence de "schèmes" ou ensembles de connaissances interreliées qui sont qualitativement différents chez le sujet novice et chez le sujet expert. Chez ce dernier, les schèmes construits sont organisés de façon hiérarchique et permettent d'unifier, par quelques caractéristiques sous-jacentes, des problèmes en apparence disparates.

Une autre différence souvent notée dans la littérature entre la compétence du sujet novice et celle du sujet expert, toujours dans le domaine de la physique (Larkin,

McDermott, Simon et Simon, 1980; Simon et Simon 1978), est que les sujets experts débutent par une analyse qualitative du problème avant de chercher à appliquer les équations appropriées. Cette représentation du problème chez le sujet expert est déterminée par les schèmes dont il dispose. C'est l'organisation et la structure fournies par les schèmes qui permettraient le recouvrement de l'information pertinente en mémoire. Ce processus d'analyse qualitative préalable limiterait la recherche d'une solution à un petit éventail d'opérations possibles. Larkin (1980 et 1983), qui a effectué plusieurs recherches sur la compétence des sujets à résoudre des problèmes de physique, souligne l'importance de cette construction d'une représentation qualitative du problème. L'une des principales différences entre sujets novices et experts serait liée au fait que les sujets novices ont tendance, dans leur analyse préliminaire du problème, à traduire d'emblée le problème en équations quantitatives sans avoir recours à l'analyse qualitative extensive qui constitue précisément une part importante des solutions générées par les sujets experts. Larkin (1983) associe la représentation du sujet novice à une "représentation naïve" et celle du sujet expert, à une "représentation physique" du problème ou de la situation. Ces représentations diffèrent toutes deux d'une représentation mathématique puisque, dans les deux cas, les règles d'inférences sont qualitatives et non directement reliées à des équations. La principale différence entre ces deux types de représentations résiderait dans la nature des entités impliquées, soit des objets familiers pour ce qui est de la représentation naïve et des concepts physiques définis de façon abstraite pour ce qui est de la représentation physique.

Reif et Heller (1981) proposent quelques raisons pour lesquelles l'enseignement de concepts scientifiques s'avère souvent inefficace. Ils font remarquer que le désir de précision, dans les sciences quantitatives telles que la physique, conduit à trop insister sur le formalisme mathématique aux dépens de modèles de description plus qualitatifs. Il leur apparaît nécessaire, pour être compétent, de disposer de descriptions à la fois qualitatives et quantitatives, et de savoir comment les utiliser de façon conjointe dans des procédures de raffinement progressif. Reif (1987) souligne, par ailleurs, le fait que ce n'est pas seulement le contenu, mais la forme même de la connaissance qui distingue la compétence du sujet novice de celle de l'expert. Dans ses recherches sur la compréhension de concepts physiques et mathématiques, il note la présence de difficultés de nature "métacognitive" se reflétant dans la façon même d'aborder l'apprentissage de la science. Non seulement les sujets novices ont-ils des représentations naïves du monde physique, mais ils ont également des représentations naïves de la science et des processus de raisonnement humains. Ces conceptions erronées joueraient un rôle particulièrement déterminant dans la façon dont les étudiants apprennent les sciences en se contentant de mémoriser les faits et les définitions verbales qui leur sont associées. Reif, comme plusieurs autres (Clement, 1982; diSessa 1986; diSessa, 1988; White et Horwitz, 1988), insiste sur l'importance de développer

une connaissance scientifique intuitive et de s'assurer que cette connaissance soit cohérente et utilisable de façon flexible.

Ces recherches sur la résolution de problèmes dans lesquels intervient une grande quantité de connaissances spécifiques à un domaine, tel que celui des mathématiques ou de la physique, montrent l'importance pour le sujet d'avoir accès à des structures de connaissances bien organisées. L'analyse de la compétence, dans des domaines précis, incite à penser que les sujets experts ont acquis un large répertoire de structures de connaissances qui leur permet de représenter les relations en jeu dans un problème ou dans une situation sous une forme qui facilite l'identification d'objectifs et la planification d'une démarche. Ce rôle central de l'organisation des connaissances suggère que l'acquisition de la compétence est un processus progressif qui nécessite une grande quantité d'apprentissages et d'expériences conduisant à une réorganisation des connaissances préalables. L'étude de l'apprentissage doit donc tenir compte des processus en fonction desquels l'apprenant intègre et organise l'information au cours de l'acquisition de nouvelles structures de connaissances.

1.1.3 Analyse des représentations initiales de l'apprenant

Les différences, abondamment notées dans la littérature, entre les structures de connaissances des sujets naïfs et celles des sujets experts ont amené plusieurs chercheurs à s'intéresser aux représentations initiales de l'apprenant et à analyser l'impact de ces représentations sur l'apprentissage de façon à pouvoir éventuellement faciliter l'acquisition de connaissances dans divers domaines. Une fois de plus, ce sont surtout les domaines scientifiques tels que les mathématiques, la physique, la biologie, la chimie, etc. qui ont retenu l'attention des chercheurs, domaines dans lesquels on observe souvent des conflits entre les connaissances intuitives que les apprenants font spontanément intervenir et la connaissance visée. Un très grand nombre de chercheurs se sont intéressés tout particulièrement aux représentations intuitives intervenant dans la compréhension de problèmes et de concepts reliés à la physique (Champagne, Kopfler et Anderson, 1980; Caramazza, McCloskey et Green, 1981; Clement, 1982; diSessa, 1980, 1986; Halloun et Hestenes, 1985a et 1985b; McCloskey, 1983; McDermott, 1983; Trowbridge et McDermott, 1980; Tiberghien, 1989; Viennot, 1979, White, 1980, White et Horwitz, 1988; etc.). Ces recherches ont mis en évidence l'existence de systèmes conceptuels alternatifs qui diffèrent considérablement de la connaissance visée au terme d'un enseignement. Ces systèmes descriptifs et explicatifs, qui présentent une certaine consistance à travers la population, semblent résister au changement et nuire au processus d'apprentissage.

Par exemple, Champagne, Kopfler et Anderson (1980) ont constaté que la croyance selon laquelle les objets plus lourds tombent plus vite que les plus légers est très peu modifiée par l'enseignement. L'un des principaux obstacles à l'apprentissage de la physique leur semble lié, non pas tant au manque de connaissances préalables de l'apprenant, qu'à la présence de connaissances conflictuelles. Les sujets font spontanément intervenir des représentations qui sont en contradiction avec celles de la mécanique et qui inhibent l'apprentissage. Gunstone et White (1981) ont remarqué que beaucoup de sujets connaissent bon nombre d'équations physiques sans être capables, toutefois, d'identifier correctement quel élément de connaissance s'applique dans telle ou telle situation. Lochhead (1985) constate, de même, que des étudiants capables de substituer des nombres dans des formules physiques complexes et de calculer les résultats, ne peuvent répondre à des questions pourtant simples sur les implications de principes physiques fondamentaux d'électricité et de mécanique. McDermott (1984) a observé, lui aussi, que même les étudiants qui réusssissent leurs examens de physique sont souvent incapables de faire preuve d'une compréhension qualitative de l'accélération en tant que rapport dv/dt, lorsqu'ils appliquent ce concept à des exemples réels de mouvement. Les travaux de Maury, Saltiel et Viennot (1977), Viennot (1978) vont dans le même sens. Les élèves peuvent se montrer capables, à l'intérieur des limites des tests et exercices scolaires, de performer correctement. Mais ils n'ont pas acquis une véritable compréhension des principes physiques de base. Ils ont une connaissance essentiellement nominale des concepts physiques qu'ils ont appris et ne sont pas capables d'appliquer ces concepts avec flexibilité. Ainsi, les sujets possèdent, préalablement à l'enseignement, des représentations naïves des phénomènes physiques qui interfèrent avec les connaissances enseignées. Ces représentations naïves sont souvent écrites en termes de théories ou de modèles internes qui conduisent à des apprentissages et à des résolutions de problèmes incorrects. Ces modèles, quoique inappropriés, s'avèrent pourtant efficaces pour rendre compte de certains phénomènes observés.

Caramazza, McCloskey et Green (1981), et McCloskey (1983) ont étudié quelques problèmes simples sur la trajectoire des objets tombant. Ils constatent que les sujets ne répondent pas de façon aléatoire et idiosyncrasique aux questions qui leur sont posées, mais semblent appliquer des croyances générales. L'analyse des réponses les conduit à associer les conceptions intuitives des sujets, à propos du mouvement, à la conception pré-galiléenne selon laquelle un objet est maintenu en mouvement par une sorte d'"impetus" qui se dissipe progressivement. Ces modèles subjectifs des lois du mouvement reflètent les systèmes conceptuels que les gens utilisent pour organiser leur expérience des objets en mouvement et en tirer un certain nombre d'inférences. Les recherches effectuées par ces auteurs les amènent à conclure que les gens abstraient de leur expérience avec le monde physique des principes généraux, constitutifs de "théories physiques naives", qui sont en contradiction avec les lois formelles de la physique. Green, McCloskey et Carammazza (1985) tentent de dégager les implications, pour

l'enseignement, de ces conceptions intuitives erronées. Ces dernières doivent être modifiées en amenant l'apprenant à prendre conscience de leur fausseté et à les remplacer progressivement par les conceptions appropriées.

Toutefois, si plusieurs chercheurs mettent l'accent sur le fait que ces représentations alternatives constituent des obstacles à l'apprentissage, d'autres (Clement, 1983, 1987; diSessa, 1983, 1986, 1988) considèrent au contraire que l'on peut trouver, dans les explications non-scientifiques des étudiants, des racines potentielles des explications scientifiques. Clement (1983) a étudié notamment la pré-conception selon laquelle "le mouvement implique la force" à l'aide de problèmes simples permettant d'identifier les principales sources d'erreurs. Bien que certaines conceptions soient erronées, Clement considère qu'elles ne doivent pas être considérées uniquement à titre d'obstacles à l'apprentissage. Elles constituent des "micro-théories" construites par l'apprenant et, à ce titre, elles doivent être respectées. Elles ont généralement des capacités prédictives dans certaines situations. On peut construire sur la base de ces préconceptions, en les modifiant de façon à accroître leur précision et leur généralité. Clement suggère différentes stratégies d'enseignement pour aider les étudiants à prendre conscience de leurs propres conceptions et à les articuler. L'une de ces stratégies repose sur l'utilisation d'analogies et d'intuitions (Clement, 1988).

diSessa (1988) offre une vision de la physique intuitive très différente de celle de McCloskey, Caramazza et Green (1981, 1983). Il suggère que la connaissance naïve, loin de constituer une théorie cohérente et bien structurée quoique fausse, serait formée d'un grand nombre de connaissances fragmentées, très peu reliées les unes aux autres et n'ayant rien du caractère systématique généralement attribué aux théories scientifiques. diSessa utilise la notion de "primitives phénoménologiques" pour désigner ces fragments de connaissances caractérisant la physique intuitive. Ces derniers constitueraient de simples abstractions, à partir d'expériences communes, qui ne nécessiteraient pas d'explication. Les phénomènes seraient simplement encodés en tant qu'évènements anticipés. diSessa (1983, 1986, 1988) en donne plusieurs exemples tels que la "loi d'Ohm", l'idée de "force continue", la notion de "balance dynamique", etc. De même, l'idée d'impetus ne constituerait pas, selon diSessa, une théorie fondamentale de la physique intuitive (Mc Closkey, Carammazza et Green, 1983), mais un fragment de connaissance appliqué à un petit éventail de problèmes. Ce caractère fragmenté de la connaissance intuitive se reflèterait dans les conceptions ou les explications très différentes que peuvent générer différentes situations ou divers contextes reflétant un même principe physique.

Cette conception de la connaissance intuitive que présente diSessa comporte des implications pédagogiques importantes. Il ne s'agit plus de confronter les théories intuitives pour provoquer un changement. Au contraire, ces fragments de connaissance naïves constituent les éléments sur lesquels il faut s'appuyer pour amener les

étudiants à développer une compréhension scientifique. diSessa (1986) propose donc d'enseigner une science qui soit en continuité et non pas en rupture avec les connaissances préalables de l'apprenant. L'objectif de l'enseignement consisterait alors à trouver une façon d'établir un "pont" (diSessa introduit la notion de "pre-science") entre la connaissance intuitive et la connaissance davantage formelle. Il s'agit en quelque sorte d'amener l'apprenant à construire une connaissance scientifique sur la base d'une réorganisation de l'intuition. Cette transition de la physique intuitive à la compréhension scientifique ne se réduirait pas à une simple modification de contenu. Elle impliquerait un changement structural majeur dans le sens de la systématisation.

Dans ses études sur l'apprentissage de la physqiue, diSessa (1981) introduit la notion d'"analyse génétique de tâche". Celle-ci diffère des formes usuelles d'analyse en ce sens qu'elle tente précisément d'identifier les composantes des théories préexistantes pouvant être impliquées dans le développement de théories plus sophistiquées. Ce qu'il importe alors d'analyser ce ne sont pas les préalables logiques, tels qu'identifiés par exemple dans les analyses hiérarchiques de Gagné (1967), mais plutôt les compréhensions partielles et génétiquement antécédantes pouvant servir de représentations transitoires donnant lieu à des corrections progressives.

D'autres recherches (Pines et West, 1985; West, 1987) soulignent également l'importance de chercher une relation significative entre la compréhension intuitive qu'a l'apprenant d'un phénomène et la connaissance scientifique visée. Ils font remarquer qu'il n'existe pas systématiquement de fossé entre les représentations initiales de l'apprenant et celles que l'on tente de lui faire acquérir. Ils distinguent, à cet égard, trois grands types de constructions de connaissances liées à l'apprentissage : le développement conceptuel, consistant à relier entre eux, en un tout organisé, des éléments de la connaissance scientifique; la résolution conceptuelle, consistant en un simple ajustement des représentations initiales; l'échange conceptuel, consistant à substituer une représentation à une autre.

1.1.4 Vers un modèle d'intervention pédagogique basé sur l'analyse de tâche

Ces différentes recherches sur la nature de la compétence et sur les représentations intuitives de l'apprenant qui sont préalables à l'enseignement ont contribué à établir un certain consensus sur le caractère essentiellement constructif de l'apprentissage. Ce dernier ne se réduit pas à une simple adjonction de connaissances, mais implique un changement de conception. Un tel changement suppose une interaction entre ce qui est nouveau et la connaissance déjà existante et le résultat de l'apprentissage dépend en grande partie de la nature de cette interaction. Il en résulte

l'image d'un apprenant qui construit activement ses connaissances (Glaser, 1987; Hewson et Beckett, 1984; Resnick, 1986). Ces recherches ont modifié notre conception du rôle de l'enseignement et ont contribué à mettre l'accent sur l'importance d'identifier les connaissances de l'apprenant et de les exploiter au niveau de l'enseignement. Comme le souligne Ramsden (1988), si l'apprentissage consiste pour l'apprenant à modifier ses conceptions préalables, l'enseignement consiste à découvrir quelles sont ces conceptions et à aider les étudiants à les modifier. Les courants actuels sur la recherche visant à améliorer l'apprentissage scolaire (Ramsden et al., 1988, etc.), en particulier dans les domaines scientifiques, accordent donc un rôle fondamental aux représentations préalables de l'apprenant et à la façon de les traiter pour les faire évoluer (Bednarz et Garnier, 1989; Pines et West, 1985; Ramsden, 1988, etc.).

Cette façon d'envisager la compétence sous l'angle d'une construction progressive, conçue comme s'élaborant en continuité ou en opposition aux croyances ou conceptions spontanées de l'apprenant, comporte des implications importantes pour l'apprentissage et l'enseignement. En effet, dans une telle perspective, si l'on veut représenter les connaissances reliées à une tâche spécifique sous une forme qui permette éventuellement d'en faciliter l'acquisition, il ne suffit pas de décrire les structures de connaissance et processus de pensée propres au sujet compétent. Il faut également être en mesure de décrire les types de connaissances ou représentations intuitives, souvent plus ou moins erronées, qui sont spontanément utilisées par l'apprenant et l'impact que ces connaissances peuvent avoir sur l'acquisition de la compétence visée.

Ainsi, Resnick (1984) considère qu'une théorie conçue pour guider l'intervention doit inclure essentiellement trois composantes interreliées : une théorie de la compétence, une théorie de l'acquisition et une théorie de l'intervention. La première consiste à décrire à la fois les comportements manifestes et les compétences sous-jacentes que l'intervention a pour but de promouvoir. Une théorie de la compétence est nécessaire pour fixer un ensemble d'objectifs d'intervention raisonnables. Une telle théorie peut dériver de l'analyse de la performance effective dans une variété de situations (par exemple, la compétence du sujet expert), mais également des recherches portant sur l'analyse de l'incompétence (par exemple, les travaux mettant en évidence les obstacles ou difficultés variées associés à la compréhension de telle ou telle notion, l'analyse des représentations préalables de l'apprenant, etc.). De même, la description d'une séquence de niveaux de compétence (approche développementale), même si elle ne constitue pas, en soi, une théorie de la compétence, peut contribuer à préciser les types de comportements ou de séquences de comportements qu'il appartient à une théorie de la compétence d'expliquer.

Une théorie de l'acquisition consiste en une théorie des processus impliqués dans l'acquisition des comportements et compétences que l'intervention a pour but de promouvoir. Autrement dit, pour pouvoir guider les processus de croissance et de

développement, nous devons être en mesure d'identifier quels sont ces processus, comment ils opèrent de façon adaptée ou de façon dysfonctionnelle. Une théorie de l'acquisition fonctionne, à cet égard, comme une théorie de la compétence, puisqu'elle guide l'intervention.

Enfin, une théorie de l'intervention doit être en mesure d'expliquer, à la lumière de théories explicites de la compétence et de l'acquisition, pourquoi certains types d'interventions peuvent s'avérer efficaces pour atteindre tel ou tel objectif. Autrement dit, pour définir les buts de l'enseignement et concevoir des situations d'apprentissage ou des types d'intervention adaptés aux objectifs poursuivis, il faut disposer de modèles suffisamment précis de la nature des connaissances visées et des processus qui en permettent l'acquistion. I l s'agit, à la fois, d'identifier les connaissances et structures intellectuelles dont dispose l'apprenant et de trouver des outils d'intervention appropriés qui vont l'aider à acquérir de nouvelles connaissances et à développer de nouvelles structures cognitives à partir de celles qu'il possède déjà. Or, Resnick fait remarquer que l'élément le plus élaboré et qui a reçu le plus d'attention est celui de la compétence, l'aspect le moins développé étant celui de l'acquisition.

C'est précisément dans ce contexte que s'inscrit notre recherche. Notre contribution se situe essentiellement au niveau de l'analyse de la compétence. Toutefois, dans la mesure où cette dernière est envisagée dans une perspective constructiviste, c'est-à-dire comme le produit d'une élaboration progressive, effectuée par l'apprenant lui-même, un modèle de la compétence n'est pas vraiment dissociable d'un modèle d'acquisition. Aussi, proposons-nous une forme de représentation de la compétence incluant des considérations explicites sur des niveaux ou étapes éventuelles d'acquisition de la compétence, de même que sur les processus pouvant intervenir dans le passage d'un niveau à un autre. La conception de la compétence que nous présentons s'appuie simultanément sur un certain nombre d'outils conceptuels fournis par quelques recherches en intelligence artificielle (notion de schème pour décrire la compétence) et sur les principaux concepts piagétiens issus du modèle de l'équilibration (principaux mécanismes d'acquistion de la compétence). Le recours à ces outils conceptuels vise à fournir une représentation de la compétence sous une forme qui permette éventuellement d'en faciliter l'acquisition.

Dans cette perspective, il nous paraît maintenant nécessaire de dégager les principaux outils conceptuels empruntés à la théorie de l'équilibration de Piaget, d'une part, et à certains travaux en intelligence artificielle, d'autre part, qui peuvent servir à élaborer un modèle constructiviste de la compétence. Nous essaierons ensuite de situer l'apport de la notion de micromonde, comme outil d'intervention et d'analyse, dans le contexte d'un apprentissage basé sur une conception interactive et constructive de l'acquisition de connaissances.

1.2. L'épistémologie constructiviste de Piaget

La théorie de Piaget constitue l'un des principaux cadres conceptuels dans le domaine du développement cognitif et de l'épistémologie constructiviste. Les travaux piagétiens sur le développement psychogénétique de certaines notions physiques et logico-arithmétiques ont eu un impact important sur les recherches en psychologie de l'apprentissage et en éducation, notamment dans le domaine de l'enseignement des mathématiques et de l'enseignement des sciences (Beilin, 1983; Bergeron et Herscovics, 1989a, 1989b; Case,1984; Groën et Kieran, 1984; Neilson, 1977; Resnick, 1984; Siegler, 1983; Murray, 1983, etc...).

Dans la perspective piagétienne, l'acquisition de connaissances est étroitement reliée au développement de l'intelligence. Ce dernier relève de processus "naturels" qui peuvent être utilisés ou accélérés par l'enseignement, mais qui n'en dérivent pas et constituent même l'un des principaux facteurs sur lesquels devrait s'appuyer un enseignement efficace [1](Piaget, 1967). En conséquence, la théorie de Piaget ne cesse de soulever des questions fondamentales quant aux rapports entre l'apprentissage et le développement (Liben, 1986; Siegel, Brodzinsky et Golinkoff, 1981; Shulman et al., 1985).

Dans quelle mesure le développement de l'intelligence conditionne-t-il l'apprentissage ?

Jusqu'à quel point les apprentissages peuvent-ils contribuer au développement des structures de l'intelligence ?

Quel rôle joue l'intervention pédagogique, tant dans le développement de la pensée que dans l'apprentissage de contenus ou de notions spécifiques ?

Ce sont d'abord les notions de stades de développement et de structures opératoires de l'intelligence qui ont retenu l'attention des chercheurs en éducation. Toutefois, ce modèle des étapes successives du développement intellectuel s'intègre lui-même à une théorie épistémologique plus large qui présente des implications pédagogiques importantes en ce qui a trait aussi bien à la nature des connaissances que l'on a pour but de transmettre qu'à la façon de les transmettre. De nombreux chercheurs, qui s'intéressent à l'apport de la réflexion épistémologique à la pédagogie (Bergeron et Herscovics, 1984; diSessa, 1986, 1988; Elkind, 1981; Groën et Kieran, 1983; Kamii, 1981; Lawler, 1984; Neimark, 1981; Papert, 1980; Vergnaud, 1983; von Glasersfeld, 1983, etc...), s'inspirent de l'approche constructiviste de Piaget dans la recherche en éducation.

1.2.1 La théorie de l'équilibration : modèle d'acquisition des connaissances

Pour Piaget, l'objet premier de l'épistémologie n'est pas tant de définir ce qu'est la connaissance, en tant qu'*état*, que de comprendre comment s'accroissent les connaissances, qu'est-ce qui caractérise leur évolution et quels sont les principaux mécanismes intervenant dans le passage d'un niveau de connaissance à un autre plus élaboré. Il envisage cette question sous l'angle de la genèse des structures de la connaissance. L'une des dimensions centrales de l'épistémologie constructiviste de Piaget est la théorie de l'équilibration. Cette théorie à la fois interactionniste et constructiviste de la connaissance emprunte à la biologie la problématique des variations adaptatives imposées à l'organisme par le milieu et des constructions qui en résultent (Piaget, 1974c). Piaget transpose cette problématique au domaine de l'évolution des connaissances, aussi bien chez l'individu (développement ontogénétique ou psychogénétique) (Piaget, 1975) que dans l'histoire des sciences (développement historique ou phylogénétique) (Piaget et Garcia, 1983).

En tant que théorie générale de l'évolution des connaissances, le modèle de l'équilibration comporte deux dimensions interreliées :

a) l'une a trait à la nature des constructions inhérentes à cette évolution, c'est-à-dire aux types de connaissances qui s'élaborent;

b) l'autre concerne la nature des mécanismes qui sous-tendent la formation de connaissances nouvelles (processus interactifs et constructifs en jeu dans l'équilibration).

A) Nature des constructions inhérentes à l'évolution des connaissances

Piaget distingue deux types de connaissances, initialement confondus, qui vont peu à peu se différencier et s'élaborer en fonction l'un de l'autre : les connaissances *logico-mathématiques* et les connaissances *physiques*.

Les connaissances logico-mathématiques correspondent aux *structures opératoires* de l'intelligence que Piaget qualifie également de *connaissances endogènes* et qui représentent les "outils d'assimilation" permettant d'appréhender la réalité. La formation progressive de ces connaissances endogènes, construites par *abstraction réfléchissante*, est étroitement liée à la capacité de rendre conscients, à travers leur utilisation, des processus de raisonnement inconscients et de réfléchir sur eux pour en abstraire certaines connaissances qui sont précisément sources de la logique et des mathématiques.

Les connaissances physiques ou empiriques correspondent à la conquête des objets ou données environnantes que Piaget qualifie également de *connaissances exogènes* et qui reflètent l'accommodation des schèmes de pensée à la réalité à connaître. La formation progressive de ces connaissances exogènes, construites par *abstraction empirique*, dépend de l'évolution même des connaissances logico-mathématiques.

Les premières (connaissances logico-mathématiques) s'identifient ainsi aux outils de la connaissance et les secondes, aux contenus acquis à l'aide de ces outils. L'une des distinctions fondamentales établies par Piaget entre la connaissance physique et la connaissance logico-mathématique est la suivante : *(...) à tous les niveaux, la connaissance physique est indissociablement physique et logico-mathématique tandis que ce second type de connaissance peut se dissocier du premier et aboutir tôt ou tard à l'état de logique ou de mathématiques pures.* (Piaget, 1975, p. 166).

Piaget va chercher à montrer que l'évolution des connaissances physiques est liée à une subordination accrue de ces connaissances aux coordinations logico-mathématiques du sujet. Cette subordination va se traduire par la distanciation croissante du sujet par rapport à l'objet, c'est-à-dire par le passage de la subjectivité (égocentrisme et phénoménisme) à l'objectivité (décentration et coordinations opératoires du sujet). Inversement, le progrès de la connaissance logico-mathématique va se manifester par une indépendance de plus en plus grande des outils de connaissance logico-mathématique, liés aux coordinations générales de l'action, par rapport aux contenus physiques sur lesquels ils portent. Cette "autonomie" va se refléter par une formalisation croissante de la pensée, source de modifications dans l'organisation même des connaissances. Autrement dit, les connaissances logico-mathématiques vont évoluer dans le sens d'une conceptualisation et d'une formalisation accrues. Ce sont ces progrès dans la formalisation qui vont permettre l'évolution des connaissances physiques, c'est-à-dire la conquête progressive de la compréhension du réel.

B) Processus d'équilibration en jeu dans la formation des connaissances

C'est l'explication des mécanismes de la formation solidaire de ces deux types de connaissances qui constitue l'objet même du modèle de l'équilibration. Piaget introduit dans son modèle un certain nombre de concepts nouveaux (*Interactions de type I et de type II*, notions d'*observables* et de *coordinations*) qui précisent la signification des processus complémentaires de l'*assimilation* et de l'*accommodation*, concepts-clés de la théorie de Piaget, le premier représentant l'apport du sujet et le second, l'apport de l'objet, dans la formation des connaissances. Ces concepts permettent également de clarifier la signification des notions d'*abstraction simple* (ou empirique) et d'*abstraction*

réfléchissante qui se réfèrent aux mécanismes par lesquels le sujet élabore des connaissances à partir des objets (connaissances physiques) ou à partir de ses propres actions sur les objets (connaissances logico-mathématiques). Nous définirons les principales notions introduites par Piaget dans son modèle avant de dégager les implications de celui-ci en ce qui a trait aux processus de construction de connaissances en jeu dans l'apprentissage.

Piaget explique aussi bien l'évolution des connaissances empiriques que la formation de nouvelles structures de connaissance logico-mathématiques par un processus d'*équilibration majorante*, c'est-à-dire par le passage d'un *état d'équilibre* à un autre qui lui est supérieur. C'est précisément cette idée d'un accroissement d'*équilibre* que traduit l'expression d'*équilibration majorante*. Cette dernière est liée à la nécessité de surmonter les *déséquilibres* engendrés par l'utilisation plus ou moins appropriée de nos connaissances préalables. Les déséquilibres tiennent au fait que les schèmes d'assimilation, dont dispose le sujet à un niveau donné, sont limités à la fois dans leur capacité d'accommodation au réel et dans leur pouvoir de coordination avec d'autres schèmes. Ces limites, sources de déséquilibres, font que certains éléments d'information vont constituer des *perturbations* pour le sujet, en fonction des schèmes évoqués ou utilisés en rapport avec un problème ou une situation particulière. Les déséquilibres sont sources de *régulations compensatrices*, solidaires de *constructions* nouvelles.

Pour rétablir l'équilibre, le sujet devra intégrer les perturbations initiales, sources de déséquilibres, à l'organisation même de ses connaissances préalables, sous la forme de variations nouvelles, au sein d'une structure de connaissance réorganisée. Piaget explique le mécanisme d'intégration progressive des perturbations, source de rééquilibration, à l'aide de deux types d'interactions complémentaires, traduisant le double aspect interactif et constructif des mécanismes de formation des connaissances : les *interactions de type I* et les *interactions de type II*. Les *Interactions de type I* désignent les relations qui s'établissent entre l'activité du sujet (assimilation) et les objets sur lesquels porte cette activité (accommodation). Elles se réfèrent donc aux diverses utilisations de nos connaissances préalables en rapport avec divers contextes ou situations. Ces interactions adaptatives peuvent engendrer des déséquilibres plus ou moins profonds dans les représentations initiales du sujet. Elles nécessitent alors des *accommodations* ou des ajustements variés qui vont conduire à la prise de conscience de l'action propre et de ses résultats sur l'objet. Les *Interactions de type II* sont étroitement reliées à l'organisation des connaissances entre elles et, notamment, à la façon dont le sujet parvient à concilier les connaissances nouvellement acquises avec ses connaissances antérieures. Elles se réfèrent essentiellement à la compréhension des objets et relations entre objets à partir des structures logico-mathématiques propres à un niveau donné. Pour caractériser la nature des mises en relation intervenant dans ces deux types d'interactions, Piaget établit une distinction fondamentale entre le niveau des

observables, c'est-à-dire *ce que l'expérience permet de constater par une lecture immédiate des faits eux-mêmes (...)* et celui des *coordinations qui comporte des inférences nécessaires et dépasse ainsi la frontière des observables*. (Piaget, 1975, p. 50).

Les interactions de type I sont définies par la mise en relation des *Obs. O* ou observables relatifs aux objets et des *Obs. S* ou observables relatifs à l'activité du sujet. Cette mise en relation, que Piaget (1974a) décrit également en termes de *processus OS*, pour souligner l'antériorité de l'objet, exprime le fait que le sujet ne prend conscience de ses propres actions qu'à travers leurs résultats sur l'objet. Autrement dit, c'est la mise en relation entre l'action effectuée par le sujet (*Obs. S*) et ses résultats constatés sur l'objet (*Obs. O*) qui amène le sujet à régler son action. Ces interactions sont sources de *régulations* dans la mesure précisément où la reprise de l'action se trouve modifiée par les résultats de son application antérieure à l'objet. Ces interactions fondamentales entre l'activité du sujet et les objets (au sens large) sur lesquels porte cette activité constituent le point de départ du mécanisme de *prise de conscience de l'action* qui va conduire à la formation de *coordinations* nouvelles.

Les interactions de type II correspondent à la mise en relation des *Coord. S* ou coordinations entre actions et des *Coord. O* ou mises en relation entre objets, en tant qu'agissant les uns sur les autres. En effet, de même que Piaget définit deux sortes d'observables (Obs.O. et Obs.S.), il distingue deux sortes de coordinations : les *Coordinations S*. qui correspondent aux opérations que le sujet applique aux objets; les *Coordinations O*. ou coordinations inférentielles entre objets qui correspondent aux opérations du sujet, mais cette fois attribuées aux objets. Ce sont elles qui interviennent dans les explications causales. Piaget considère les Coord. S comme antérieures aux Coord. O. Il désigne du nom de *processus SO* (Piaget, 1974a) le passage des premières aux secondes. Ce processus *"exprime (...) ce fait fondamental que pour comprendre et même pour découvrir les relations causales entre objets, le sujet est obligé de passer par l'intermédiaire de ses propres opérations"*. (Piaget, 1975, p. 61). Les interactions de type II désignent en quelque sorte le mécanisme de *prise de connaissance de l'objet* à partir, non pas de simples constatations, mais d'inférences liées aux coordinations opératoires propres à un niveau donné. Elles reposent donc sur les structures opératoires du sujet, ces structures résultant toujours d'une construction effectuée à partir des mises en relation d'observables antérieures ou interactions de type I.

C'est par la combinaison et l'alternance de ces deux types d'interactions que Piaget explique le mécanisme de l'équilibration majorante. Il considère en effet que les interactions de type II (ou mises en relation des Coord S. et O.) englobent les interactions de type I et sont constitutives d'un processus séquentiel d'équilibration pouvant comporter un certain nombre d'états successifs. La signification conjointe de ces deux processus ou types d'interactions est la suivante : *(...) d'une part, le sujet ne*

parvient à une conscience claire de ses propres actions qu'à travers leurs résultats sur les objets (interactions de type I), *mais d'autre part, il ne réussit à comprendre ces derniers qu'au moyen d'inférences liées aux coordinations de ces mêmes actions* (interactions de type II) (Piaget, 1975, p. 59)

Les notions d'observables et de coordinations sont centrales puisqu'elles constituent, en quelque sorte, la traduction dans le langage de l'équilibration des abstractions simples et réfléchissantes, liées respectivement à la formation des connaissances physiques et logico-mathématiques. L'une des distinctions établies par Piaget entre les observables et les coordinations rejoint, en effet, la distinction déjà établie entre connaissance physique et connaissance logico-mathématique : "(...) *les Observables de n'importe quel niveau peuvent être fournis aussi bien par les objets que par les actions, tandis qu'une coordination inférentielle, même appliquée ou (finalement) attribuée aux objets, ne peut avoir pour source que la logique du sujet, c'est-à-dire celle qu'il tire de près ou de loin des coordinations générales de ses propres actions*". (Piaget, 1975, p. 274).

Dans la perspective de l'équilibration majorante, tout le problème de l'évolution de la connaissance logico-mathématique, dont dépend l'évolution même de la connaissance physique, réside dans l'explication centrale du passage des observables de niveau n aux coordinations de niveau n+1, du passage des constatations aux inférences et aux déductions, des contenus aux formes, des actions matérielles aux opérations déductives, etc..., bref des connaissances empiriques exogènes aux connaissances logico-mathématiques de nature endogène. Ce sont en effet les coordinations propres à un niveau donné qui déterminent ce qui est "observable" pour le sujet et ce qui ne l'est pas. Et ce sont les relations progressivement effectuées entre les observables d'un niveau donné qui vont permettre la formation progressive de coordinations nouvelles, de niveau supérieur. Le passage d'un niveau de connaissance à un autre correspond donc à la formation de coordinations nouvelles. Celles-ci engendrent la découverte de nouveaux observables qui vont constituer, à leur tour, le point de départ de coordinations de niveau encore supérieur (équilibration majorante).

Ce modèle offre donc une explication générale des mécanismes de formation de connaissances nouvelles à partir des connaissances antérieures et de leurs interactions adaptatives avec les objets. La complémentarité et l'alternance des *interactions de type I et de type II* signifie essentiellement deux choses : c'est par l'intermédiaire de la connaissance des objets que nous sommes amenés à élaborer de nouveaux instruments de connaissances et, réciproquement, c'est parce que nous améliorons ces derniers que nous parvenons à mieux connaître la réalité.

1.2.2 Les implications pédagogiques du modèle de l'équilibration

La théorie de l'équilibration ne constitue certes pas un modèle d'apprentissage, mais bien plutôt une théorie épistémologique visant à fournir une explication générale des processus de construction de connaissances nouvelles, à quelque niveau que ce soit. Bien que ce caractère très général de la théorie rende difficile son application directe au contexte de la pédagogie et de l'enseignement, il n'en demeure pas moins que cette perspective épistémologique comporte des implications pédagogiques importantes lorsque l'on cherche à définir et à analyser la compétence sous l'angle d'une construction progressive effectuée par le sujet lui-même. Dans cette section, nous tenterons donc de dégager à la fois les limites du cadre conceptuel piagétien et sa contribution potentielle à une vision intégrée de la compétence et des processus d'acquisition.

A) Les aspects interactifs et constructifs de la connaissance

La perspective épistémologique de Piaget souligne deux aspects fondamentaux des connaissances qui peuvent avoir un impact important sur nos conceptions de l'apprentissage et de l'enseignement: ce sont les aspects constructifs et interactifs de la connaissance.

L'aspect constructif

La connaissance étant, pour Piaget, un processus et non un état, les connaissances doivent être envisagées sous l'angle de leur formation, c'est-à-dire comme un processus en continuel devenir. Bien des connaissances qui nous paraissent aller de soi sont en réalité le fruit d'une élaboration progressive dont on peut retracer la genèse. Une notion, un concept, une représentation se construisent par étapes qui ne sont pas sans relation les unes avec les autres. Chacune de ces étapes débute en effet par une réorganisation de ce dont elle hérite des précédentes et elle implique une intégration au moins partielle des acquis antérieurs (Piaget et Garcia, 1983). Toute connaissance est donc relative à un certain niveau de développement et elle est toujours susceptible d'être dépassée. Elle correspond à un certain degré d'élaboration du savoir à l'intérieur d'un processus de construction graduelle où il y a place pour divers niveaux d'approximation. On peut donc concevoir l'existence de différents niveaux de construction ou de conceptualisation notionnelles qui, loin de refléter uniquement des lacunes dans nos connaissances, sont au contraire le point de départ des constructions ultérieures. Chaque niveau constitue à la fois le résultat des possibilités ouvertes par le pré-

cèdent et la condition nécessaire à l'élaboration du suivant. Les notions piagétiennes de *stades de développement* et de *structures opératoires de l'intelligence* renvoient précisément à cette idée d'étapes (ou niveaux) dans le processus de construction d'une connaissance. Elles suggèrent une certaine continuité entre les connaissances de niveau intuitif et la connaissance davantage formalisée.

Dans cette perspective, on ne saurait dissocier les connaissances acquises du processus même de leur construction. La question de savoir ce que signifie "comprendre" telle ou telle notion renvoie donc au problème de savoir comment cette notion se construit chez l'enfant ou chez l'apprenant, quels sont les principaux critères permettant de caractériser divers niveaux de compréhension (Bergeron et Herscovics, 1984; Papert, 1980) et quels sont les mécanismes assurant le passage d'un niveau de connaissance à un autre plus élaboré (Inhelder, Sinclair et Bovet 1974). Ainsi, ce qui fait qu'une notion peut s'apprendre et la façon dont elle peut s'apprendre sont étroitement reliés au processus de développement qui en assure la construction. Or, ce processus de construction n'est ni additif ni linéaire. Il ne consiste pas simplement à accumuler des éléments d'information provenant du dehors, mais à les intégrer à nos connaissances ou représentations initiales et à modifier ces dernières pour rendre l'intégration possible. Il implique des restructurations, c'est-à-dire des modifications plus ou moins importantes dans l'organisation même de nos connaissances préalables.

Les restructurations de nos connaissances initiales, qui apparaissent notamment dans le passage d'un niveau de conceptualisation à un autre, sont le produit de rééquilibrations effectuées en réponse à des déséquilibres. Les déséquilibres traduisent les lacunes de nos connaissances par rapport aux problèmes ou situations que nous cherchons à assimiler. Les rééquilibrations consistent à élaborer de nouvelles connaissances qui compensent ces lacunes en y intégrant de nouveaux éléments d'information. L'acquisition de connaissances, aussi bien physiques que logico-mathématiques, est étroitement liée au fait que nous apprenons à réfléchir non seulement sur la réalité qui nous entoure, mais sur la façon dont nous manipulons et utilisons diverses informations. C'est l'un des principaux mérites de Piaget que d'avoir montré l'importance, pour le développement intellectuel, de cette capacité que nous avons de réfléchir sur nos propres actions et processus de pensée. Ainsi, une part importante de nos connaissances provient non pas des objets (connaissances physiques) mais des actions que nous exerçons sur eux (connaissances logico-mathématiques) et des accommodations successives que nous sommes amenés à faire. Ces connaissances, relatives à nos propres façons de comprendre ou d'apprendre, jouent un rôle fondamental dans le passage d'un niveau de connaissance ou de conceptualisation à un autre.

Piaget insiste tout particulièrement sur le fait que l'utilisation d'une connaissance précède sa formalisation. Il appelle *thématisation* (Piaget et Garcia, 1983, p. 124) *ce passage de l'usage ou utilisation implicite, à l'utilisation consciente et à la conceptua-*

lisation. Cet aspect central de la construction des connaissances, qui souligne l'existence d'un décalage entre l'usage (ou aspect instrumental) d'une connaissance et sa thématisation (c'est-à-dire prise de conscience et conceptualisation d'une notion), présente des implications pédagogiques particulièrement importantes dans le domaine de l'enseignement des sciences. De ce point de vue, une connaissance formalisée résulte toujours d'une prise de conscience de connaissances informelles, mais néanmoins déjà utilisées par le sujet, et d'une réflexion sur ces connaissances. Elle ne peut être que le résultat d'un processus de formalisation progressive de raisonnements naturels, le plus souvent inconscients. Le formalisme, en tant que résultat d'une démarche de formalisation progressive, ne devrait donc pas intervenir dès le début d'une enseignement, mais uniquement à titre de structuration de connaissances informelles déjà utilisées par le sujet sous une forme plus ou moins consciente. Il importe alors de ne pas confondre la simple connaissance d'un formalisme avec le "processus" de formalisation d'une connaissance.

Dans la perspective piagétienne, l'élaboration des connaissances logico-mathématiques joue un rôle central dans l'acquisition de nouvelles connaissances empiriques. En effet, la formation d'une notion, qu'elle soit physique (ex. : notion de mouvement) ou logico-mathématique (ex. : notion de proportion), est toujours solidaire du développement de certains outils de structuration qui, eux, sont de nature logico-mathématique. La complexité d'une connaissance dépend donc en partie du niveau de structuration nécessaire à sa compréhension. En particulier, la compréhension de bien des notions physiques et logico-mathématiques requiert, selon Piaget, le développement des structures opératoires constitutives de la pensée formelle (Piaget, 1973a, 1973b). L'un des principaux problèmes que rencontre l'enseignement est précisément de déterminer à quel niveau de conceptualisation fait appel une connaissance particulière et comment on peut faciliter le processus de formalisation, autrement dit le passage de l'observation de sa propre activité à la réflexion sur celle-ci (Groën et Kieran, 1983).

L'aspect interactif

La connaissance étant, pour Piaget, un processus essentiellement adaptatif, les interactions avec l'environnement jouent un rôle fondamental dans l'élaboration de connaissances nouvelles. L'expérience modifie la structure de nos connaissances et réciproquement, cette dernière affecte la nature de nos expériences. Ainsi, on ne peut développer de nouvelles connaissances qu'à travers l'utilisation et la manipulation des connaissances déjà acquises. Et c'est parce que cette utilisation génère parfois des déséquilibres dans nos représentations initiales que nous sommes amenés à en prendre conscience et à les modifier. La dynamique générale de l'équilibration, qui se traduit par l'alternance continuelle des *interactions de type I et de type II*, exprime l'idée selon

laquelle c'est à travers leur utilisation que le sujet est amené à modifier ses connaissances. Ce sont ses expériences variées avec des objets, des situations, des personnes, des évènements, etc. qui vont conduire à des réorganisations de la pensée. Et c'est dans la mesure où ces interactions ont pour effet de stimuler chez le sujet le processus de réflexion sur ses propres connaissances qu'il en résultera des modifications importantes dans l'organisation préalable de ses connaissances.

Ainsi, les interactions avec l'environnement sont sources de connaissances nouvelles dans la mesure où elles ont pour effet d'induire des déséquilibres dans nos représentations initiales et des conduites régulatrices ayant pour but de surmonter ces déséquilibres en intégrant, à l'organisation même des connaissances, les éléments d'information nouveaux et initialement perturbateurs. Piaget précise en effet que *dans une perspective d'équilibration, l'une des sources de progrès dans le développement des connaissances est à chercher dans les déséquilibres comme tels, qui seuls obligent un sujet à dépasser son état actuel...* (Piaget, 1975, p.17). Pour développer de nouvelles connaissances, il faut donc réaliser que ce que l'on sait est incomplet ou partiellement erroné. Il faut pouvoir *donner un sens* à ce que l'on apprend en rapport avec ce que l'on sait déjà. Il y a des informations (observables) qu'un sujet ne peut assimiler parce qu'il ne possède pas les outils (coordinations) ou les connaissances préalables qui lui permettent de leur donner une signification.

Le développement des connaissances est lié à l'alternance continuelle des processus d'*assimilation* et d'*accommodation*, des *Interactions de type I* et des *Interactions de type II*. L'assimilation cognitive consiste à "conférer des significations" à la lumière de nos connaissances et de nos expériences préalables et l'accommodation consiste à "ajuster nos représentations initiales" aux caractéristiques des objets ou situations que nous cherchons à assimiler. L'assimilation constitue pour Piaget le fait premier sans lequel aucune accommodation n'est possible. Quant aux accommodations, elles prennent la forme, dans le modèle de l'*équilibration majorante*, de *compensations* solidaires de *constructions* nouvelles. Le caractère indissociable des compensations et des constructions, sur lequel Piaget insiste beaucoup, traduit simplement la double nécessité pour le sujet de s'adapter et par conséquent de se modifier au contact de son environnement, tout en conservant l'intégrité des connaissances et structures déjà construites. C'est précisément par cette *composition de production et de conservation* que Piaget définit les processus d'équilibration majorante. En somme, les rééquilibrations effectuées par le sujet en réponse aux déséquilibres consistent à engendrer, au contact d'expériences avec les objets, des constructions nouvelles qui, tout en dépassant les structures anciennes, sont compatibles avec elles au lieu de s'y substituer tout simplement. En tant que succession de déséquilibres et de rééquilibrations, le développement des connaissances apparaît donc essentiellement dialectique. Cette dialectique se manifeste par une modification constante et réciproque de l'objet par le sujet et du sujet par

l'objet. En d'autres termes, le sujet structure l'expérience à l'aide des connaissances dont il dispose et, réciproquement, il améliore le contenu et l'organisation mêmes de ses connaissances à partir de ses expériences variées. C'est pourquoi interactions et constructions sont toujours intimement liées.

Piaget oppose ainsi à la diversité et à l'hétérogénéité des structures de la connaissance, la continuité des processus fonctionnels qui en assurent la construction. Il précise que *"les seuls facteurs vraiment omniprésents dans les développements cognitifs - aussi bien en histoire des sciences qu'en psychogénèse - sont de nature fonctionnelle et non structurale. Ils ont trait à l'assimilation des nouveautés aux structures précédentes et à l'accommodation de celles-ci aux acquisitions nouvellement réalisées"*. (Piaget et Garcia, 1983, p. 38). C'est cette continuité fonctionnelle des processus d'assimilation et d'accommodation qui assure la transition entre un niveau de représentation et un autre. À cet égard, la théorie de l'équilibration devrait s'appliquer aussi bien à l'apprentissage qu'au développement de l'intelligence ou à l'évolution de la connaissance scientifique.

B) L'apprentissage en tant que processus d'équilibration des connaissances

L'épistémologie constructiviste de Piaget propose une conception essentiellement interactive du fonctionnement des connaissances qui montre l'importance de l'activité du sujet dans le processus d'acquisition d'une compétence et le caractère "auto-constructeur" de la pensée, c'est-à-dire la nécessité pour l'apprenant de reconstruire ou de "réinventer" les notions à partir de ses propres connaissances et expériences. Elle souligne la constante solidarité entre les interactions adaptatives avec l'environnement, qui sont liées à l'utilisation de nos connaissances préalables, et les interactions constructives ou réorganisations de la pensée qui résultent de ces interactions.

L'apprentissage, en tant que processus de construction de connaissances, peut être conçu, à l'image du développement, comme le produit d'interactions avec l'environnement qui conduisent d'un niveau d'équilibre relatif à des déséquilibres puis à des rééquilibrations. On peut en effet supposer que ce sont les mêmes processus interactifs et constructifs qui interviennent dans l'apprentissage et dans le développement de la pensée. Ces processus consisteraient à élaborer, à partir des connaissances dont le sujet dispose au départ et de leurs interactions adaptatives avec l'environnement, des connaissances et des structures plus riches et plus complexes qui intègreraient, en les dépassant et en les corrigeant, les connaissances et les structures des niveaux antérieurs. L'acquisition de connaissances nouvelles, que ce soit au cours du développement psychogénétique ou dans le contexte plus restreint d'un enseignement délibéré, reposerait sur la possibilité de créer des liens, de construire des structures plus complexes à travers la manipulation et la mise en relation de structures plus simples. Tout apprentissage suppose donc une activité importante de la part de l'apprenant puisqu'il

implique une interaction nécessaire entre ce qui est nouveau et les connaissances existantes. Le résultat de l'apprentissage est étroitement relié à la nature de cette interaction, c'est-à-dire aux déséquilibres plus ou moins importants générés par celle-ci et aux rééquilibrations permettant de les surmonter.

Une telle conception de l'apprentissage modifie largement notre conception du rôle de l'enseignant. Selon von Glasersfeld (1983), ce modèle de la connaissance incorpore une certaine vision du processus de transmission des connaissances : la connaissance n'est pas un 'produit' qui peut se transmettre directement. Pour que la transmission de connaissances soit possible, il faut faire appel à ce que l'apprenant sait déjà et aux outils d'apprentissage dont il dispose. Cependant, la présentation d'une connaissance ou d'une information nouvelle peut poser le problème éventuel d'un "conflit" ou d'une "contradiction" entre les connaissances déjà acquises auxquelles l'apprenant fait appel et celles que l'on tente de lui faire acquérir. C'est alors le rôle de l'enseignant que de voir à ce que les obstacles appropriés soient rencontrés et de trouver des stratégies qui peuvent aider l'apprenant à surmonter ces conflits ou ces déséquilibres. Si l'on veut qu'un apprentissage soit "significatif", il importe donc de déterminer à quels types de problèmes un concept nouveau, une nouvelle procédure, peuvent constituer pour l'apprenant une "réponse" appropriée (Vergnaud 1983). En somme, ce que le sujet construit doit pouvoir être relié à ce qu'il connaît.

Resnick (1986) souligne, elle aussi, combien ce caractère central de la construction de connaissances dans l'apprentissage scolaire comporte des implications importantes pour l'enseignement. Dans ce contexte, le rôle de l'enseignant n'est pas de transmettre un savoir déjà tout élaboré, mais de fournir les matériaux sur lesquels les processus de construction de l'apprenant vont pouvoir s'exercer. Il s'avère alors très utile de pouvoir représenter non seulement la compétence visée, c'est-à-dire les connaissances vers lesquelles on oriente la démarche des sujets, mais également les connaissances et processus de raisonnement spontanément utilisés par l'apprenant. Enseigner revient alors à orienter un processus de construction "naturel" de manière à faciliter la transition entre l'état initial de l'apprenant et la compétence visée.

Si l'épistémologie constructiviste de Piaget et la conception interactive de l'apprentissage qui s'en dégage présentent des implications pédagogiques importantes, cela ne signifie évidemment pas que l'une et l'autre soient directement applicables au contexte de l'enseignement. Il existe en effet un certain écart entre une théorie du développement intellectuel et un modèle d'intervention pédagogique. La première vise à fournir un modèle de la nature des constructions propres à l'intelligence et des processus intervenant dans l'acquisition de connaissances. Le second a pour but d'exploiter ces processus en rapport avec des objectifs d'apprentissage précis. Selon Case (1978), un modèle d'intervention pédagogique doit être en mesure de fournir des "principes" qui

tiennent compte des différences individuelles, d'une part, et de la complexité relative de diverses tâches pouvant faire appel à un même contenu notionnel, d'autre part.

Comme le font remarquer plusieurs auteurs (Case 1978; Resnick 1984; Lawler, 1982; Papert 1980), la perspective de Piaget en est une de compréhension et non pas d'intervention. L'objectif de Piaget est de comprendre comment la connaissance se développe et non d'intervenir dans le processus d'apprentissage. Il ne précise donc pas quels sont les "facteurs environnementaux contrôlables" sur lesquels on peut intervenir pour favoriser le développement de telle ou telle connaissance. Il ne s'attarde pas non plus à identifier les divers facteurs pouvant intervenir dans l'évocation et l'utilisation appropriées de nos connaissances ni à analyser les processus variés impliqués dans la compréhension d'une tâche spécifique ou les obstacles éventuels qu'un sujet doit surmonter pour parvenir à assimiler une connaissance particulière.

De nombreux auteurs (Beilin 1980; Boden 1982; Groën et Kieran 1983; Resnick, 1984; Papert, 1980) considèrent que les analyses effectuées par Piaget mettent plutôt l'accent sur les aspects structuraux de la connaissance que sur ses aspects fonctionnels ou procéduraux. Le modèle logico-mathématique utilisé par Piaget pour représenter la connaissance souligne le rôle central de l'activité du sujet dans la formation des connaissances, mais il ne rend pas suffisamment compte de la spécificité des connaissances liées à l'expérience, de leurs dimensions contextuelle et procédurale. En particulier, la notion de "schème d'assimilation", liée à celle de "coordinations logico-mathématiques", est loin d'épuiser l'ensemble des éléments et processus de connaissance impliqués dans la compréhension d'un problème spécifique ou l'exécution d'une tâche particulière. Certes, Piaget introduit la notion de "décalage horizontal" pour rendre compte des écarts temporels possibles dans l'application d'un même schème à divers domaines (ex. : nombre, espace, etc) ou contenus. Toutefois, cette notion de "schème d'assimilation" fait plus ou moins abstraction de la très grande diversité des contenus sur lesquels un même schème peut s'exercer et des contextes variés dans lesquels il peut être évoqué. Or, il importe, lorsque l'on cherche à faciliter l'acquisition d'un concept ou d'une notion particulière, de tenir compte de la difficulté relative que peut présenter l'abstraction d'une connaissance selon les tâches ou les contextes particuliers impliqués. Ainsi, Vergnaud (1983) souligne que, même si l'on estime essentielle une approche constructiviste de l'apprentissage, on ne peut correctement décrire une compétence (par exemple en mathématiques) sans faire référence au "contenu de connaissance spécifique" sur lequel elle s'exerce. Toutes les situations faisant appel à un même concept n'exigent pas nécessairement le même niveau de conceptualisation. Il s'avère alors utile de faire l'analyse cognitive de différentes situations d'apprentissage, puisqu'un même concept ne renvoie généralement pas à un seul type de situations.

Par ailleurs, bien que Piaget reconnaisse le rôle fondamental de l'expérience dans la formation des connaissances, puisque sa perspective en est une

d'interaction (Piaget, 1975; Inhelder, Sinclair et Bovet, 1974), il ne précise pas quels types de connaissances peuvent générer des expériences particulières et en quoi celles-ci peuvent contribuer au développement. Il insiste davantage sur la dépendance des connaissances physiques par rapport aux outils logico-mathématiques que sur la manière dont l'apprentissage de contenus de connaissances spécifiques peut éventuellement contribuer au développement des opérations générales de l'intelligence. Or, si l'on veut intervenir pour faciliter l'acquisition de connaissances particulières, il importe de préciser davantage que ne le fait Piaget comment certaines expériences ou situations d'apprentissage peuvent affecter la connaissance et quels types de modifications peuvent survenir dans l'organisation des connaissances au contact de ces expériences.

La théorie de l'équilibration, centrée sur l'aspect fonctionnel des connaissances et sur les processus qui en assurent la construction, fournit une explication générale du rôle des interactions avec l'environnement (notions de perturbations, déséquilibres, compensations, différenciation, intégration, etc.) dans la formation des connaissances. Toutefois, ce modèle d'acquisition, issu de préoccupations relatives à la psychogénèse et à l'histoire des sciences, mérite d'être précisé dans le contexte "microgénétique" de l'apprentissage et de l'enseignement. Gréco (1976, p. 71) formule très bien cette problématique générale :

> *Le modèle de l'équilibration est, chez Piaget, énoncé en des termes qui, en principe, conviennent aussi bien à l'étude synchronique qu'à l'étude diachronique. (...) On peut en retour reprocher à Piaget d'avoir projeté sur l'ensemble des processus d'apprentissage le modèle diachronique de l'équilibration par paliers. Est-ce inévitable ? Autrement dit, si l'équilibration est un processus bio- et psychogénétique absolument général, doit-on s'attendre à retrouver, en tout apprentissage expressément finalisé par l'expérimentateur aussi bien que dans la résolution de problèmes, une "microgénèse" ayant la même description, les mêmes propriétés que la genèse proprement dite ?*

Selon Boden (1982), les mécanismes d'équilibration décrits par Piaget ne sont pas suffisamment précis pour rendre compte des divers processus impliqués dans la compréhension, l'apprentissage ou la résolution de problèmes spécifiques. Elle considère notamment que la notion piagétienne d'*organisation* a un caractère essentiellement hiérarchique qui limite la compréhension des processus d'intégration liés à l'apprentissage et des types d'organisations (non seulement hiérarchiques mais hétérarchiques) qui peuvent en résulter. Resnick (1984) fait elle aussi remarquer le caractère un peu vague des notions d'équilibration, d'assimilation et d'accommodation pour rendre compte des processus d'acquisition liés à l'apprentissage scolaire.

Par conséquent, si la perspective épistémologique de Piaget fournit un cadre conceptuel général à une conception interactionniste et constructiviste de

l'apprentissage, certains aspects méritent d'être précisés. Les mécanismes d'équilibration décrits par Piaget, notamment la distinction entre les interactions adaptatives *(Type I)* et constructives *(Type II)*, les notions d'*Observables* et de *Coordinations*, peuvent s'avérer extrêmment intéressants dans la description et l'analyse des processus de construction en jeu dans l'apprentissage. Toutefois, la théorie de Piaget ne fournit pas de modèle de représentation des connaissances incarnées dans des tâches spécifiques. Aussi, sa contribution éventuelle à un modèle constructiviste de la compétence se situe-t-elle davantage au niveau de la description de certains mécanismes pouvant intervenir dans l'acquisition de la compétence, qu'au niveau de la description de cette compétence. Si les outils conceptuels développés par Piaget ne semblent que partiellement adaptés à la description et à l'analyse de la compétence associée à une tâche spécifique, plusieurs auteurs (Beilin, 1980; Boden, 1982; Grōen et Kieran, 1983; Lawler, 1985; Murray et al., 1983; Papert, 1980; Resnick, 1984, etc.) soulignent la complémentarité de la théorie de Piaget et de certains modèles basés sur les théories du traitement de l'information. En particulier, certains travaux en intelligence artificielle permettent d'apporter des spécifications d'ordre conceptuel, méthodologique et expérimental, propres à enrichir le cadre conceptuel piagétien.

1.3 L'Intelligence Artificielle

Selon Boden (1982), plusieurs concepts développés à partir de recherches en intelligence artificielle peuvent contribuer à clarifier la perspective piagétienne de l'équilibration, car ils sont précisément conçus pour représenter les processus dynamiques et l'organisation du contrôle des connaissances à l'intérieur d'un système dynamique et fonctionnel. Dans la mesure où ils rendent davantage explicites certains aspects plutôt implicites de la théorie épistémologique de Piaget (Papert, 1980), ils peuvent aider à développer des théories de la compréhension et de l'apprentissage aptes à nous guider dans la conception et l'analyse de situations d'apprentissage.

1.3.1 Quelques problèmes théoriques fondamentaux en Intelligence Artificielle

L'intelligence artificielle s'est initialement donnée pour objectifs de reproduire, à l'aide de machines, différentes formes de conduites "intelligentes" (Boden, 1977; Goldstein et Papert, 1977; Minsky et Papert, 1977; Minsky, 1988; Papert, 1980; Schank

et Childers, 1985; Winston, 1977). Cette discipline, née grâce aux progrès effectués conjoitement dans différentes disciplines telles que la psychologie, la médecine, la logique, la linguistique, l'informatique et la cybernétique, présente un caractère interdisciplinaire qui n'est pas sans évoquer l'idéal piagétien d'une épistémologie inter ou pluridisciplinaire. Il existe cependant différentes approches et des domaines d'études variés en intelligence artificielle (ex. : la robotique, la vision automatisée, les systèmes experts, etc.). Schank (1984) distingue plus particulièrement deux grandes approches: l'approche technologique et l'approche scientifique qui présentent toutes deux un intérêt particulier pour l'éducation.

La première, orientée vers la production et les applications technologiques de cette discipline, cherche à utiliser au maximum les possibilités de l'ordinateur et à développer des techniques puissantes permettant de faire exécuter par la machine des tâches relativement complexes. Les systèmes experts sont issus de cette approche. Ces programmes, basés sur des règles et intégrant une grande quantité de connaissances spécifiques à un domaine, peuvent s'avérer très utiles. Mais ils ne constituent pas pour autant des "modèles" appropriés du fonctionnement de la pensée, ni même des processus de raisonnement qu'utilise le sujet expert.

La seconde approche, d'orientation plus théorique, utilise les modèles informatiques comme un moyen pour mieux comprendre le fonctionnement de la pensée. La construction de programmes constitue alors non pas un objectif mais une méthodologie nouvelle. L'ordinateur devient un outil permettant de concrétiser, dans la machine, des modèles ou des théories à propos du fonctionnement de la pensée. Comme le note Schank (1985a), les programmes conçus dans cette perspective constituent alors davantage des outils d'expérimentation que des résultats. Ces tentatives pour faire exécuter par la machine les tâches humaines même les plus triviales confrontent les chercheurs à la nécessité de décrire avec précision l'ensemble des connaissances et des habiletés nécessaires à l'exécution de ces tâches. C'est dans cette approche que s'inscrivent les travaux de diSessa (1977), Lawler (1985), Minsky (1986), Papert (1980), Winston (1977), Schank (1985). Ces chercheurs explorent des questions fondamentales à propos du fonctionnement de l'intelligence, de l'apprentissage, de la compréhension, du langage, etc. qui rejoignent, à plusieurs égards, les préoccupations de l'épistémologie piagétienne de même que plusieurs des questions qu'abordent la psychologie de l'apprentissage et les recherches en éducation.

L'intelligence artificielle peut être considérée, dans cette seconde approche, comme une science de l'analyse de tâches cognitives qui cherche à décrire explicitement les connaissances qu'un sujet doit posséder pour parvenir à manipuler des blocs, comprendre et utiliser le langage, apprendre un nouveau concept ou utiliser une nouvelle procédure, etc. (Côté, 1981). Ceci a amené plusieurs chercheurs à s'interroger sur la manière dont les connaissances doivent être structurées dans la mémoire de façon à pouvoir être utilisables et modifiables. L'un des problèmes-clés de l'intelligence artificielle est celui de la représentation des connaissances. Elle aborde le problème de l'intelligence et de la connaissance dans une perspective épistémologique qui rejoint, à plusieurs égards, l'approche interactionniste et constructiviste de Piaget.

La connaissance est envisagée du point de vue d'un système qui l'utilise, donc dans un contexte essentiellement interactif où l'on ne peut dissocier la représentation des connaissances de celle de leurs modes d'utilisation. Dans cette perspective, l'accent est mis, non pas seulement sur les éléments de connaissances impliqués dans la compréhension d'une tâche, mais sur l'utilisation qu'en fait un système et sur les significations qu'il lui confère. Ce caractère contextuel de la connaissance conduit à l'idée qu'un même concept peut donner lieu à des représentations multiples selon les contextes variés dans lesquels il est utilisé. Il s'agit alors de comprendre comment ces diverses représentations peuvent éventuellement interagir et se coordonner. Par ailleurs, l'utilisation appropriée des connaissances, en fonction du contexte, soulève le problème de la nature des processus impliqués dans l'évocation et dans l'utilisation des connaissances pertinentes : comment un système parvient-il à rechercher et à extraire les connaissances pertinentes qu'il possède en mémoire ? Pour un système possédant une grande quantité de connaissances, une large part de la résolution de problème consiste en effet à les retrouver en mémoire. Un tel système possède une organisation très dynamique. D'où la nécessité de représenter, non seulement les connaissances reliées à un domaine particulier, mais les connaissances nécessaires pour pouvoir évoquer et utiliser l'information appropriée *(métaconnaissances)*, en fonction de tâches ou de contextes précis. Ces métaconnaissances présentent un certain lien avec les connaissances que Piaget qualifie de "logico-mathématiques" et qui sont précisément relatives à nos propres pensées et à nos modes d'acquisition de connaissances.

Le problème de l'intelligence se pose en termes d'apprentissage ou d'acquisition de connaissances nouvelles, donc du point de vue de son développement (Goldstein et Papert, 1977). Dans la perspective de l'intelligence artificielle, un système intelligent, naturel ou artificiel, est un système capable d'apprendre. Ceci soulève la

question de savoir comment un système peut accroître ses connaissances, à partir de celles qu'il possède, sans compromettre son fonctionnement : *Comment un cerveau pourrait-il continuer de fonctionner tout en changeant ou en ajoutant des agents et des connexions ?* (Minsky, 1988, p.194) Ce problème de la conciliation entre les structures déjà construites et l'acquisition de connaissances nouvelles rejoint la problématique piagétienne de l'équilibration des structures cognitives : comment la pensée parvient-elle à maintenir un contrôle intégratif à travers un processus continuel de différenciation structurale ? L'un des aspects centraux de l'intelligence humaine réside en effet dans l'habileté d'auto-organisation, c'est-à-dire dans la capacité de se modifier elle-même en fonction de sa propre expérience. Un système intelligent ne doit pas seulement produire des résultats intéressants, il doit aussi être capable d'expliquer pourquoi il le fait et, par conséquent, de réfléchir sur sa propre démarche. L'intelligence réside donc en partie dans la connaissance des connaissances que l'on possède et dans la capacité d'être conscient de l'utilisation que l'on en fait. Ainsi, le "savoir faire" n'est pas équivalent au "savoir pourquoi", ce qui suggère l'existence de divers niveaux de connaissances (pratique vs conceptualisé) qui ne sont pas sans relation les uns avec les autres.

L'intelligence artificielle se distingue cependant de l'approche piagétienne principalement à deux égards :

- en ce qui a trait d'abord à ses objectifs, lesquels sont axés sur la simulation de conduites intelligentes et la construction de modèles de tâches humaines;

- en ce qui a trait ensuite à ses outils aussi bien conceptuels que méthodologiques. Les premiers sont largement tributaires des théories du traitement de l'information. Les seconds reposent sur la possibilité de concrétiser les théories à propos de la pensée dans des programmes permettant d'exécuter des tâches plus ou moins complexes.

Ces travaux ont conduit à identifier et à décrire les connaissances qu'il est nécessaire de posséder pour parvenir à utiliser de façon appropriée les divers éléments de connaissance pertinents à une tâche ou à un domaine particulier. Tout en se rattachant, comme la théorie de Piaget, à une épistémologie constructiviste, ils soulignent davantage que ne le fait l'approche piagétienne l'interdépendance des contenus et des processus de pensée. Par ailleurs, ils conduisent à mettre l'accent sur la dimension "procédurale" de la connaissance et non pas simplement sur sa dimension "structurale", comblant ainsi ce que plusieurs (Beilin, 1980; Boden, 1982; Papert, 1980; Resnick, 1984; etc.) considèrent être des lacunes du modèle piagétien.

1.3.2 Notion de schème et modèle de la compétence

Pour concevoir un enseignement basé sur une conception interactive et constructive de l'apprentissage, il importe de disposer de modèles de représentation des connaissances qui permettent de faire le lien entre les connaissances que les apprenants font spontanément intervenir et la compétence visée. La notion de schème s'avère, à cet égard, un outil conceptuel intéressant. Les schèmes sont des "structures interactives" permettant d'emmagasiner une variété de connaissances. Ils correspondent à l'ensemble des éléments et processus de connaissance interreliés qui sont utilisés pour agir ou raisonner sur une situation (Côté, 1981). Ils constituent des réseaux complexes reliant entre elles des connaissances de divers niveaux sous une forme qui en permet une utilisation efficace. Anderson (1977) voit plusieurs analogies entre le concept de *"schème"*, tel qu'il est défini par l'intelligence artificielle, et la notion piagétienne de *"schème d'assimilation"*. Un tel concept met l'accent sur l'interaction nécessaire, dans quelque domaine que ce soit, entre les données provenant de l'extérieur et la connaissance déjà existante.

La théorie des schèmes (Goldstein et Papert, 1977; Minsky et Papert, 1972; Minsky, 1977 et 1980; Ortony, 1978; Rumelhart et Ortony, 1977; Rumelhart, 1980 et 1983-84; Schank et Abelson, 1977; Schank et Childers, 1985) constitue un modèle de la façon dont les connaissances peuvent être représentées dans notre mémoire de façon à permettre à la fois l'accès à l'information pertinente et l'utilisation des connaissances déjà acquises dans l'enregistrement de l'information et l'acquisition de connaissances nouvelles. Dans la perspective de la théorie des schèmes, la compréhension repose en grande partie sur la capacité de générer des anticipations à partir de nos connaissances et de nos expériences préalables. Elle suppose l'évocation et l'utilisation appropriées des connaissances dont on dispose. Comprendre, c'est traiter les faits, les expériences en fonction des ressources disponibles, c'est conférer des significations (Schank, 1985). Notre aptitude à apprendre provient en grande partie de notre habileté à établir des liens entre ce qui est nouveau et ce qui est déjà connu.

Nous possédons en mémoire un très grand nombre de connaissances spécifiques reliées à des expériences particulières. Ces connaissances ont une structure qui contient de l'information sur la façon de les utiliser. Elles correspondent à la fois à des descriptions et à des procédures opérant sur ces descriptions (Goldstein et Papert, 1977). Celles-ci représentent nos expériences variées avec des objets, des lieux, des

situations, des personnes, etc. et elles intègrent des informations sur l'importance relative des diverses caractéristiques d'un objet, d'une situation, d'un problème, etc. Les schèmes sont en quelque sorte des *prototypes* des classes d'objets ou de situations qu'ils représentent.

Minsky (1988) et Papert (1980) utilisent la métaphore d'une "société de la pensée" pour représenter l'organisation des schèmes dans notre mémoire. Cette image de la pensée reflète l'idée selon laquelle des conduites complexes peuvent émerger de l'interaction entre des composantes relativement simples. Selon ces auteurs, nous possédons en mémoire un très grand nombre de petits éléments et processus de pensée, des ***agents***, dont les interactions peuvent produire des entités plus complexes, des ***agences***, qui peuvent elles-mêmes interagir et se regrouper. Chaque agent peut être chargé d'exécuter des tâches spécifiques en rapport avec un objectif complexe. L'exécution d'une tâche, même apparemment simple, peut nécessiter l'intervention d'une très grande quantité de ces *micro-habiletés* ou compétences associées à chacun des agents. Lawler (1985) emploie le terme de *"microvisions"* pour représenter ces structures de connaissances disparates, issues d'expériences particulières, qui peuvent éventuellement interagir et se coordonner pour produire des connaissances plus élaborées. De même, la notion de *"primitives phénoménologiques"*, chez diSessa (1986, 1988), traduit elle aussi cet aspect modulaire de la connaissance. L'interaction fonctionnelle et dynamique de ces diverses composantes implique des connaissances d'un autre niveau, les *connaissances de contrôle* (diSessa, 1977; Minsky, 1988), qui en gèrent l'évocation et l'utilisation appropriées en rapport avec une situation ou un problème spécifiques.

Ainsi, nous ne disposons pas de représentations ou de solutions déjà tout élaborées pour chaque situation ou problème auxquels nous pouvons être confrontés. Nous devons constamment ajuster nos connaissances ou représentations préalables aux éléments d'information provenant du dehors. Il y a une multitude de façons d'organiser divers éléments de connaissances selon les contextes ou les objectifs visés. La compréhension est donc un processus essentiellement dynamique qui consiste à reconstruire en mémoire des schèmes, c'est-à-dire à mettre divers éléments de connaissances en relation les uns avec les autres, dans une organisation utilisable. Or, les relations entre les "agents" de la pensée ne sont pas seulement "hiérachiques" puisque deux compétences peuvent s'utiliser simultanément l'une l'autre ou qu'un même agent peut être utilisé simultanément à différents niveaux. L'organisation des connaissances dans notre mémoire présente une "structure hétérarchique" de contrôle (Minsky et Papert, 1972; Minsky, 1988) qui a l'avantage d'être flexible en fonction du contexte.

Ce modèle de représentation des connaissances, qui souligne le caractère "fragmenté" de la connaissance, présente des implications particulièrement intéressantes au niveau de l'apprentissage parce qu'il permet de décrire la compétence sous une forme "décomposable" et par conséquent "apprenable" : la connaissance est modularisable. Autrement dit, une compétence relativement complexe peut être décomposée en compétences plus simples qui peuvent être composées, à leur tour, de plus petites compétences, "agents" ou "micro-habiletés". Toutefois, pour que ces diverses compétences puissent produire une compétence complexe, elles doivent être reliées les unes aux autres par un réseau approprié d'interconnexions. Il ne suffit donc pas d'identifier chacun de ces éléments et la façon dont il fonctionne. Il faut également connaître les interactions de chaque partie avec celles auxquelles elle est connectée. Il faut également comprendre comment toutes ces interactions partielles se combinent à leur tour.

Dans cette perspective, on peut donc représenter la compétence associée à une tâche comme un ensemble de connaissances plus élémentaires qui dépendent les unes des autres. En effet, la construction d'une compétence résulte précisément d'une combinaison progressive de compréhensions partielles et de "micro-habiletés" qui se coordonnent et interagissent de façon particulière. Décrire cette compétence va alors consister à identifier quels sont les divers éléments et processus de connaissances impliqués dans la tâche, comment chacun d'eux fonctionne et de quelle façon il interagit avec les autres éléments auxquels il est interrelié (Minsky, 1986). Tout apprentissage se réfère ainsi à de petits morceaux ou éléments de connaissances progressivement construits qui, en se combinant et en interagissant de diverses façons, peuvent engendrer des connaissances extrêmement complexes. Cette vision "atomiste" de la pensée conduit à mettre l'accent sur l'aspect de contrôle des connaissances. En effet, un aspect central de la compétence réside alors dans la "structure de contrôle" qui gère la façon dont ces diverses composantes doivent se regrouper et interagir pour parvenir à tel ou tel résultat.

Ainsi, puisque la compétence repose sur la capacité d'utiliser de façon conjointe et efficace divers éléments et processus de connaissance, l'acquisition de la compétence va consister à construire et/ou à sélectionner progressivement ces éléments et processus de connaissance pertinents et à les regrouper au sein d'une organisation fonctionnelle (schème) qui permette de les utiliser de façon appropriée. Tout comme dans la perspective piagétienne de l'équilibration, il y a une certaine continuité entre les connaissances intuitives et informelles et la connaissance davantage formalisée. Une part importante de l'apprentissage consiste à développer de nouvelles façons d'utiliser les connaissances déjà acquises et à élaborer de nouvelles "structures de contrôle" qui

permettent de combiner des "descriptions" et d'ajouter de nouvelles procédures aux systèmes de description ou de déduction déjà élaborés (Minsky et Papert, 1972). De ce point de vue, *apprendre, ce n'est pas seulement accumuler des compétences. Quoique nous apprenions, il y a toujours plus à apprendre, ne serait-ce que sur les utilisations possibles de ce qui est déjà acquis* (Minsky, 1988, p.180).

Cette façon de concevoir l'apprentissage permet de préciser davantage, à l'échelle "microgénétique", le modèle de l'équilibration, c'est-à-dire quelles formes prennent, dans le contexte de l'apprentissage, les interactions constructives liées à l'équilibration, quelles sont les modifications survenant dans l'organisation des connaissances au contact de l'expérience. Comme le note Cellérier (1987), *dans le cadre conceptuel de la psychologie génétique, la notion la plus proche de celle d'agent est celle de schème d'action et la "society theory" ouvre ainsi la voie à ce que l'on pourrait appeler une théorie plus darwinienne de l'évolution et de l'équilibration des schèmes* (p. 126). En effet, l'amélioration d'une performance implique toujours de petits changements dans l'organisation cognitive, en particulier au niveau des "structures de contrôle" qui ont pour fonction d'"administrer" l'utilisation des connaissances déjà acquises. Le "principe de Papert", qui met l'accent non pas tant sur l'addition d'éléments de connaissances que sur l'élaboration de nouvelles façon d'organiser et d'utiliser nos connaissances en fonction de problèmes ou de situations variés, exprime clairement cette conception de l'apprentissage liée à une vision "modulaire" de la pensée :

> *Certaines des étapes les plus cruciales du développement mental sont fondées non pas seulement sur l'acquisition de nouvelles compétences, mais sur l'acquisition de nouveaux processus administratifs d'utilisation de ce que nous savons déjà.* (Minsky, 1988, p.184).

1.4. Notion de micromonde et modèle d'intervention pédagogique

La notion de "micromonde" se rattache à un modèle d'intervention pédagogique basé sur une conception interactive et constructive de l'apprentissage. Cette notion a été introduite par Papert (1980) pour décrire l'environnement pédagogique que constitue la "géométrie tortue", basée sur l'utilisation du langage Logo, en tant que "contexte d'apprentissage piagétien" ou "spontané". La perspective de Papert s'inspire largement des aspects épistémologiques de la théorie de Piaget et des modèles de représentation des connaissances fournis par l'intelligence artificielle. Mais elle se situe au niveau de l'intervention. Aussi, met-elle davantage l'accent sur le rôle de l'expérience dans la formation des connaissances et sur la façon dont on peut faciliter l'apprentissage

de notions abstraites en intervenant au niveau de l'environnement qui sert de support à cet apprentissage. L'objectif de Papert est de trouver des outils d'intervention qui peuvent aider l'apprenant à développer de nouvelles structures intellectuelles à partir de la manipulation et de la mise en relation des structures de connaissance déjà acquises.

1.4.1 Micromondes naturels

Papert considère l'environnement naturel comme la source d'un vaste réseau de "micromondes" qui se développent séparément, mais qui peuvent également se regrouper et permettre ainsi l'émergence de structures plus complexes. C'est le cas, par exemple, de structures telles que l'ordre, les combinaisons algébriques, les relations topologiques, etc. dont la combinaison progressive engendre le nombre. Chacune d'elles reflète une activité cohérente et significative qui peut être apprise et avoir un sens indépendamment des autres. Par exemple, lorsque l'enfant établit des correspondances terme à terme, il est, selon Papert (1980), dans un "micromonde de pairage" et les objets pairés représentent le support environnemental de l'activité de l'enfant. S'il a accès à des structures d'ordre et d'inclusion (qui caractérisent, selon Piaget, les structures de connaissances propres à la pensée opératoire concrète), c'est parce qu'il peut voir et manipuler des objets. L'enfant interagit constamment avec son environnement, mais il n'entre pas en relation avec tous les éléments de cet environnement dont la richesse et la complexité lui échappent en partie. Il parvient à abstraire des situations les caractéristiques importantes et significatives pour lui. Il apprend en simplifiant, en se construisant des modèles approximatifs de la réalité. Il effectue naturellement un certain découpage qui lui permet de structurer celle-ci morceau par morceau, domaine par domaine. C'est d'ailleurs ainsi que Piaget décrit la formation de la pensée opératoire concrète. Une fois que l'enfant est parvenu à structurer ces petits morceaux, ceux-ci vont servir de "blocs de construction" à l'édification de connaissances beaucoup plus complexes.

Selon Papert, ces processus au moyen desquels les enfants parviennent à comprendre la réalité en la simplifiant et en corrigeant, par approximations successives, leurs représentations initiales, sont très efficaces et constituent la base même du processus d'"apprentissage naturel" décrit par Piaget. Bien qu'un tel processus d'apprentissage ne nécessite pas d'intervention pédagogique pré-établie, il mérite d'être exploité dans l'enseignement. Papert (1980) considère, en effet, que les modèles de représentation des connaissances les plus pertinents à l'éducation sont précisément les modèles dynamiques de la façon dont les structures intellectuelles se construisent et se développent. Il insiste sur le principe fondamental de la "modularité épistémologique", c'est-à-dire sur l'idée selon laquelle une connaissance relativement complexe peut être décrite comme le résultat d'une construction à partir de la combinaison de structures de connais-

sances plus simples ou plus "intuitives" qui peuvent être utilisées, aussi bien à titre de "module" indépendant et autonome, qu'en interaction les unes avec les autres. Cette idée de "modularité" des connaissances se retrouve également chez Minsky (notion d'"agents"), chez Lawler (notion de "microvisions") et chez diSessa (notion de "primitives phénoménologiques"). Elle conduit à représenter les connaissances sous la forme de structures disparates ou encore de perspectives multiples, issues d'expériences particulières, qui peuvent donner lieu à une intégration, favorisant ainsi l'acquisition de nouvelles connaissances de contrôle. Ce passage de connaissances fragmentées à des connaissances mieux intégrées et plus systématisées repose sur la possibilité d'avoir accès, dans l'environnement, à certains types d'expériences qui nous incitent à utiliser les connaissances déjà acquises pour en acquérir de nouvelles.

Un micromonde, c'est donc essentiellement un outil d'apprentissage d'"inspiration piagétienne" conçu pour servir de support tant au développement des structures intellectuelles qu'à l'acquisition de connaissances reliées à un domaine. C'est un contexte interactif qui favorise un apprentissage reposant sur la manipulation, la découverte et la reconstruction actives de certaines notions, par l'apprenant, à partir de ses connaissances préalables et de leurs modifications progressives au contact d'expériences variées.

1.4.2 Micromondes artificiels

La notion de micromonde artificiel est liée à l'utilisation de l'ordinateur comme outil pour concevoir des types d'expériences qui ne sont pas accessibles dans l'environnement naturel de l'apprenant. Pour Papert comme pour Piaget, une structure abstraite ne peut être que le résultat formalisé d'un processus d'abstraction reposant sur la manipulation et la mise en relation d'objets ou de situations concrètes. L'objet concret, manipulable, constitue un support essentiel à l'apprentissage et à la formalisation. Papert (1975) estime que, si l'enfant ou l'apprenant accèdent difficilement à des habiletés cognitives et à des connaissances qui requièrent un certain degré de formalisation, c'est en grande partie à cause de la pauvreté des matériaux offerts comme support au développement de ces habiletés et connaissances. Les micromondes artificiels, basés sur l'ordinateur, ont précisément pour but de concrétiser, de rendre accessibles à la manipulation des notions ou des concepts relativement abstraits, en tenant compte des connaissances préalables de l'apprenant. Ils sont par définition, concrets, manipulables et interactifs. Ce sont des "domaines d'expériences" que l'on peut explorer et dont on peut se faire différentes représentations (théories partiellement fausses et transitoires) à partir des expériences que génère leur exploration. Ils sont conçus de façon à faciliter l'établissement de liens entre les connaissances informelles, enracinées dans l'expérience et la

connaissance davantage formalisée. En particulier, ils permettent de représenter, sous une forme concrète et manipulable, les notions ou les concepts abstraits dont la compréhension nécessite souvent le recours à ce que Piaget appelle la pensée opératoire formelle. Lawler (1982) en donne un exemple avec le schème de contrôle des variables qui peut être incarné par la manipulation des variables ANGLE, DISTANCE et CHANGE, de la procédure "POLY-SPI". Ce micromonde permet de saisir l'utilité du contrôle et de la quantification des variables (composantes essentielles de la "pensée formelle"), à travers les dessins extrêmement variés que cette procédure permet de générer.

Un micromonde artificiel ne se réduit donc pas à la simulation d'objets ou de phénomènes puisqu'il intègre également les actions permettant d'agir sur l'objet et d'en modifier l'état. Par exemple, le micromonde de la "géométrie-tortue" comprend à la fois la tortue et les actions (Avance, Recule, Droite, Gauche, etc.) qui permettent de modifier son état et de construire, avec cet objet, d'autres objets de complexité variée (formes géométriques). L'enfant ou l'apprenant peut choisir lui-même les actions qu'il désire effectuer. Et c'est parce qu'il utilise les mêmes actions (Avance, Recule, Droite, Gauche), mais selon différentes combinaisons, pour produire une variété de figures, qu'il peut établir entre elles certaines relations. Les relations qu'il établit ainsi reposent moins sur la similarité des résultats que sur les relations entre les actions elles-mêmes qui ont permis de produire ces résultats. La manipulation des objets d'un micromonde n'est pas axée uniquement sur la production de résultats, mais sur le développement d'habiletés d'apprentissage et de résolution de problème et sur la découverte empirique de "procédés heuristiques". Dans ce contexte, on ne peut dissocier l'apprentissage de contenus ou de notions (connaissances physiques) et le développement d'habiletés (connaissances logico-mathématiques). On retrouve ici la complémentarité des *types d'interactions (I et II)* définis par Piaget dans son modèle de l'équilibration. Tout apprentissage est lié à l'action, laquelle suppose l'utilisation des connaissances dont on dispose, la possibilité d'en prendre conscience, de les tester et de les rectifier à travers leur utilisation.

Cette possibilité de créer, avec l'ordinateur, des micromondes artificiels, pour pallier à la pauvreté des matériaux de l'environnement en regard de la construction de certaines notions et structures intellectuelles, constitue une innovation importante en éducation. Un micromonde artificiel ne doit donc pas être redondant par rapport à un "micromonde naturel". Il doit apporter quelque chose de plus. Le micromonde de la "géométrie tortue" constitue précisément ce que Papert qualifie de "paradigme" de micromonde à inventer, car il ne peut survenir dans l'environnement naturel de l'enfant et requiert absolument la présence de l'ordinateur. La "tortue" constitue une concrétisation dynamique et manipulable d'une notion abstraite : celle du "point". Elle fait appel aux connaissances préalables de l'apprenant : l'enfant peut s'identifier à la tortue puisque celle-ci se déplace comme lui, il peut essayer de lui faire faire les déplacements qu'il est

lui-même capable d'exécuter. Un tel objet peut donc servir d'outil, de support concret pour passer de la structure pratique (liée à l'action) de nos propres déplacements dans l'espace à une structure représentative de ces mêmes déplacements. C'est au sens piagétien du terme, un outil d'"expériences logico-mathématiques", c'est-à-dire d'expériences qui permettent d'abstraire des connaissances à partir de nos propres actions ("abstraction réfléchissante"). Il facilite la reconstruction, sur un autre palier (celui de la représentation), des connaissances et structures déjà acquises sur un premier palier (celui de l'action). Ainsi, un micromonde bien conçu doit pouvoir servir de support à la réflexion et à la conceptualisation, par le biais des actions qu'il permet d'exécuter et des transformations que ces actions produisent sur l'objet.

Selon Groën et Kieran (1983), deux aspects essentiels des micromondes en font des outils privilégiés d'"expériences logico-mathématiques". D'abord, le fait que les transformations soient définies indépendamment des états : elles correspondent aux commandes entraînant des changements d'états d'objets concrets. Par exemple, les commandes Avance, Recule, Droite et Gauche de la "géométrie-tortue", sont indépendantes de la position ou de l'orientation de la tortue sur l'écran. De même la commande "coup", dans le micromonde de la "tortue dynamique" de diSessa (1977), est indépendante de la vélocité de la tortue. Un second aspect essentiel est que les transformations elles-mêmes peuvent devenir des objets. En effet, un carré, un triangle, etc. sont à la fois des objets, formes ou figures *(observables)*, et un ensemble de transformations successives *(coordinations)* produisant un certain résultat. On retrouve là l'une des idées centrales du modèle de l'équilibration à savoir que : les coordinations d'un niveau n (ex. : un carré) deviennent, à un niveau n + 1, des observables qui peuvent à leur tour donner lieu à des coordinations nouvelles (par exemple, une maison faite d'un carré et d'un triangle).

Dans un micromonde, il doit exister une relation étroite entre la structure d'un résultat et la succession des actions qui en permettent la réalisation. Par exemple, la structure du carré est étroitement reliée à la succession des actions qui l'ont produite. L'un des aspects essentiels de l'apprentissage, dans un tel contexte, est précisément la possibilité de saisir, à travers une diversité d'expériences, cette relation entre la structure des actions et celle des résultats qu'elles produisent. Ainsi, l'utilisation des commandes (ou "opérateurs") d'un micromonde nous donne la possibilité de réfléchir, non seulement sur les résultats de nos actions, mais sur ces actions elles-mêmes et sur les erreurs que peut générer leur utilisation plus ou moins appropriée. Or, l'activité qui consiste à trouver la cause d'une erreur peut engendrer des modifications importantes dans les représentations initiales de l'apprenant. Celui-ci est en quelque sorte incité à réfléchir sur la façon de produire un résultat et à utiliser les feedbacks de l'environnement pour modifier son approche. Ceci correspond à ce que Piaget décrit en termes d'*équilibration majorante*, c'est-à-dire par le passage des *observables O.* aux *observables S.* puis de ceux-ci aux *coordinations S.* et ensuite aux *coordinations O.* En somme, rectifier l'"erreur" consiste à

essayer de découvrir en quoi les résultats obtenus, qui peuvent d'ailleurs s'avérer fort intéressants et sources de connaissances nouvelles, diffèrent des résultats anticipés ou recherchés et à modifier nos actions en conséquence.

On rejoint ici l'essentiel de la théorie de l'équilibration qui met précisément l'accent sur la réorganisation des connaissances à partir des déséquilibres et rééquilibrations que génère leur utilisation dans un contexte d'expériences riches de découvertes. Dans cette perspective on peut concevoir, aussi bien l'apprentissage que le développement des schèmes et structures de la pensée, comme l'élaboration progressive par rééquilibrations, c'est-à-dire par tâtonnements et approximations successives, d'un système de schèmes pouvant présenter une structure "hétérarchique" de contrôle. Cette métaphore de l'intelligence artificielle rejoint l'un des aspect centraux du processus d'équilibration majorante qui consiste justement à passer d'un contrôle rétroactif et exogène, exercé par l'environnement (les messages d'erreurs) sur l'activité du sujet, à un contrôle endogène et proactif exercé par les mécanismes internes de la structure (le système de schèmes). On y retrouve des processus analogues de différenciations, de coordinations et d'intégrations hiérarchiques de diverses structures de connaissances progressivement construites, au contact d'expériences variées.

DEUXIÈME PARTIE

CONCEPTION ET ANALYSE DU MICROMONDE

CHAPITRE 2

CONCEPTION DU MICROMONDE

The real world is full of invisible forces like friction and those due to imperceptible deformations (...) Making things like dynaturtle may be the best we can do at making some of the real objects of science experiential.

(diSessa, 1986, p. 210)

A computer microworld should be constructed around a powerful idea, one worth the instructor's time to develop or the student's time to explore... An idea is powerful for a person if it relates and unifies knowledge gained in diverse experiences. An idea gain power if it can be reduced to a concrete model that serve as a metaphor for the interpretation of subsequent problems (...) The most essential characteristic of powerful ideas is their relation to the individual previous knowledge (...)

(Lawler, 1982, p. 150)

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord un certain nombre de recherches qui mettent en évidence les principales difficultés rencontrées par les étudiants dans la compréhension de notions de base reliées à la dynamique newtonienne et nous introduisons l'idée que les micromondes permettent d'expérimenter puis de conceptualiser des notions de physique peu accessibles à l'expérience immédiate. Nous décrivons ensuite le micromonde de mouvements que nous avons élaboré à partir du programme de la "tortue dynamique" de diSessa (1982). Ce micromonde a été conçu en tenant compte des obstacles identifiés dans les recherches préalablement citées. Il se rattache à un certain champ conceptuel. Aussi, identifions-nous les principaux concepts qui peuvent être acquis à travers l'exploration des actions et des phénomènes incarnés dans le micromonde.

2.1 Micromondes et apprentissage de la physique

2.1.1 Principaux obstacles à la connaissance physique

Le domaine de connaissance que nous avons choisi pour illustrer l'apport de la notion de micromonde, comme outil d'intervention pédagogique, est la physique. Ce choix n'est pas arbitraire. En effet, ce domaine reflète particulièrement bien le carac-

tère expérientiel de la connaissance et l'impact de nos connaissances préalables dans la compréhension des phénomènes et l'acquisition de connaissances nouvelles. De très nombreuses recherches ont mis en évidence les difficultés variées qu'éprouvent les étudiants dans la compréhension de concepts physiques soit disant élémentaires tels que la force, la vitesse, l'impulsion, le mouvement, l'accélération (Caramazza et al., 1981; Champagne, Gunstone et Klopfer, 1985; Chi, Feltovitch et Glaser, 1982; Clement, 1982; Halloun et Hestenes, 1985; diSessa, 1977, 1982, 1986; Larkin, McDermott, Simon et Simon, 1980; Mc Closekey et Carammazza, 1980; Mc Dermott, 1984; Reif, 1983, 1985; Trowbridge et Mc Dermott, 1980, 1981; Viennot, 1979; White, 1983). Certaines de ces difficultés sont reliées au formalisme utilisé pour représenter ces phénomènes. Mais ce formalisme ne constitue que l'un des nombreux obstacles que rencontrent les étudiants.

Plusieurs des concepts de la physique sont constamment évoqués dans la vie courante pour expliquer une varité de phénomènes accessibles à l'observation. Cette utilisation généralisée et quotidienne joue un rôle important dans la façon dont nous comprenons les notions fondamentales de la dynamique (Maury, Saltiel et Viennot, 1977; diSessa, 1986; White, 1981, Carammazza et al., 1981). En effet, les concepts sont très influencés par leurs contextes d'utilisation. Ils peuvent donner lieu à des représentations multiples en fonction des situations variées dans lesquels ils sont évoqués ou utilisés et selon les phénomènes qu'ils ont pour but d'expliquer. Cependant, comme le note diSessa (1986), les notions formelles de la physique ne reflètent pas le monde tel que nous le percevons si bien qu'il y a souvent une dissociation importante entre les connaissances intuitives, élaborées sur la base de nos expériences quotidiennes avec les objets, et le modèle formel que l'on enseigne.

Par exemple, selon le modèle formel, une force constante produit une accélération constante et, en l'absence de force, un objet conserve son état de repos ou de mouvement uniforme. Or, le mouvement uniforme est une situation "idéale" qui contredit l'expérience quotidienne que nous avons du mouvement. En effet, celle-ci nous indique, contre toute évidence formelle, que pour maintenir une vitesse constante, il faut exercer une force constante et qu'en l'absence de force, un mobile est loin de conserver un mouvement et par conséquent une vitesse uniforme. Ce que nous observons, c'est un phénomène d'accélération puis de décélération progressives qui évoque une transformation réversible conservant à l'objet son immobilité initiale, comme si cette dernière constituait une propriété physique de l'objet au même titre que sa masse ou son volume. Ainsi, le mouvement uniforme, qui n'est pas autre chose qu'un *état* de l'objet au sein d'un système

de *transformations*, n'est pas observable. Il y a donc là une difficulté qui tient, non pas simplement à la complexité inhérente à la structure des variables en jeu, mais à l'écart qui sépare le modèle formel de l'intuition suggérée par ce qui est directement accessible à l'observation. Comme le soulignent plusieurs auteurs (Carammazza, diSessa, Papert, Viennot, etc.), l'usage des mêmes termes dans la physique que l'on enseigne et dans celle que l'on se construit ne signifie pas qu'il s'agisse des mêmes notions. Cet écart entre les modèles intuitifs que nous construisons spontanément sur la base de nos expériences et le modèle formel que l'on enseigne constitue une importante source de difficulté.

Les difficultés d'ordre formel ne suffisent donc pas à elles seules à rendre compte des nombreux problèmes que rencontrent les étudiants dans l'apprentissage de la dynamique. Les étudiants n'ont aucune expérience du mouvement newtonien "pur". Faute de ce type d'expérience, l'apprentissage des lois du mouvement se fait à travers la manipulation d'équations ou de modèles abstraits plutôt qu'en interagissant avec des objets. Or, on ne doit pas confondre la connaissance d'un domaine avec la connaissance d'un formalisme (diSessa, 1977). L'étudiant peut apprendre à maîtriser les relations formelles unissant différentes équations sans pour autant parvenir à les utiliser convenablement pour expliquer le mouvement dans divers contextes phénoménologiques (Champagne, Klopfer et Anderson, 1980; Clement, 1982; diSessa 1977; Viennot, 1979; White, 1983, etc.). Ainsi, l'enseignement formel s'avère souvent inefficace parce qu'il ne tient précisément pas compte des conceptions intuitives des étudiants et traite ces derniers comme s'ils connaissaient déjà les principes de base et n'avaient plus qu'à apprendre à les formaliser et à les quantifier (Caramazza et al., 1981). Par ailleurs, si le raisonnement intuitif se manifeste souvent par les erreurs que génère son utilisation, il peut également conduire à un résultat juste sans qu'intervienne la théorie enseignée. On parle alors de "sens physique" et ce dernier constitue une part importante de la compétence de l'expert (diSessa, 1986; Larkin et al., 1980; Viennot, 1979). diSessa (1986, 1988) insiste tout particulièrement sur le rôle, en quelque sorte "pédagogique", de la connaissance naïve dans l'acquisition d'une connaissance scientifique davantage systématisée.

> *(...) fragments of intuitive knowledge form parts of developing scientific knowledge such as qualitative versions of laws, partially explanatory "cover stories", etc... This involvement of intuitive knowledge in scientific domains accounts for the ability of a scientist to make smooth transition between his*

commonsense experience and more technical characterisation of it.

(diSessa, 1986, p. 220).

La physique constitue donc un excellent exemple de domaine dans lequel une théorie formelle entre en conflit avec les connaissances intuitives auxquelles nous avons spontanément recours. Faute de stratégies appropriées pour faire face à ces conflits, il arrive souvent que les étudiants développent deux types distincts de physique opérant à l'intérieur de schèmes représentatifs très différents. Le langage formel de la physique apparaît alors comme un bel exemple de ce que Papert (1980) qualifie d'"apprentissage dissocié" c'est-à-dire d'apprentissage qui n'est pas relié aux connaissances et aux expériences préalables de l'apprenant. Le défi de l'enseignement est alors précisément de trouver des outils permettant d'établir un "pont" entre ces éléments de la connaissance intuitive, qui proviennent d'abstractions à partir de l'expérience, et la connaissance davantage formalisée (diSessa, 1986, 1987).

2.1.2 Des micromondes pour l'apprentissage de la physique

L'utilisation de micromondes, dans le contexte de l'apprentissage de la physique, peut contribuer à lever plusieurs des obstacles rencontrés dans la pédagogie traditionnelle parce qu'elle permet de rendre "expérientielles" des notions abstraites (Papert, 1980; diSessa, 1986; White, 1983; Brna, 1987). Grâce à son pouvoir de simulation, l'ordinateur nous donne la possibilité de mettre l'étudiant en présence du mouvement newtonien, inaccessible à son expérience quotidienne, et de représenter, sous une forme théoriquement idéale, les effets de la force sur le mouvement. On peut faciliter la compréhension "opérationnelle" des relations entre force et mouvement en concevant des micromondes dans lesquels n'interviennent qu'une seule force et qu'un seul objet (diSessa, 1986). Selon Papert (1980), les critères devant servir à l'élaboration de micromondes doivent précisément s'appuyer sur l'identification des obstacles intervenant dans la construction des notions dont on veut faciliter l'acquisition. Un micromonde de mouvement est donc un environnement d'apprentissage qui met l'accent sur le caractère fonctionnel et expérientiel de la connaissance physique. Il peut être considéré comme un contexte phénoménologique pouvant servir de support à l'élaboration d'une représentation qualitative de certains phénomènes. Or, cette représentation qualitative constitue

une part importante des solutions générées par les sujets experts (diSessa, 1984; Chi, Feltovitch et al., 1982).

Un micromonde (Papert, 1980; diSessa, 1977; White, 1981) peut être défini essentiellement en fonction :

- de l'état de l'objet et des propriétés qui le caractérisent, cet objet pouvant être plus ou moins complexe;
- des "opérateurs" permettant de modifier cet état: ceux-ci correspondent aux actions qui peuvent être exercées sur l'objet;
- des phénomènes ou situations variées pouvant résulter de ces actions ou combinaisons d'actions.

Défini ainsi, un micromonde de mouvement est en quelque sorte l'incarnation concrète et dynamique d'un "système de transformations" comprenant certains *invariants* et certaines *règles* de transformation que l'on peut découvrir ou reconstituer à travers les actions effectuées sur l'objet et les transformations ou résultats concrets produits. Papert (1980) le qualifie d'"environnement d'apprentissage piagétien" des lois des mouvements. Autrement dit, il s'agit d'un apprentissage qui se fait en interagissant avec des phénomènes concrets et en construisant simultanément, à travers ces interactions, des connaissances relatives aux objets *(connaissances physiques)* et des connaissances relatives à nos propres actions sur les objets *(connaissances logico-mathématiques)*.

Apprendre la physique, dans ce contexte, c'est apprendre à contrôler le mouvement de l'objet en fonction des lois qui gouvernent son comportement. C'est d'abord et avant tout acquérir une connaissance pratique de ces lois, laquelle doit être considérée comme préalable à une connaissance davantage formalisée. La possibilité pour l'apprenant de manipuler lui-même des phénomènes newtoniens, à partir des actions définies dans le micromonde, l'incite à réfléchir sur la façon de produire ces phénomènes et à établir des liens entre les actions exercées sur l'objet et les changements d'états qu'elles engendrent. Les actions et phénomènes incarnés dans le micromonde servent alors de support concret et expérientiel à l'abstraction de connaissances nouvelles. Un tel contexte favorise la découverte empirique et la reconstruction active par l'apprenant lui-même, à partir de sa propre activité, de certains aspects centraux des lois du mouvement. diSessa (1982) souligne le caractère extrêmement riche des

"expériences de découvertes" que l'on peut faire à l'aide de micromondes artificiels en comparaison de la pauvreté des expériences newtoniennes auxquelles nous donne accès le monde réel.

> *"The value of the computer in that context is not in simulating or replacing reality, but in providing complementary experiences that combine with mundane ones, and in provoking and supporting "re-experiences" that we want students to have".* (diSessa, 1986, p. 214)

2.1.3 Un exemple de micromonde newtonien : la Tortue Dynamique

Le programme D.T. (Dynaturtle) développé par diSessa (1982) constitue une illustration d'un micromonde newtonien incarnant quelques-unes des lois de base de la dynamique. La "tortue dynamique" est l'équivalent, à l'égard du mouvement, de ce qu'est la "géométrie-tortue" par rapport au déplacement. Elle constitue un objet plus complexe que cette dernière, celle-ci pouvant être considérée comme une partie de la tortue dynamique. L'état de la tortue dynamique est défini par sa position et son orientation (comme celui de la géométrie-tortue), mais également par sa vélocité. Cette dernière comprend deux composantes vectorielles qui sont la direction et la grandeur de la vitesse. De même que la géométrie-tortue constitue une concrétisation dynamique de la notion abstraite de point, de même la tortue dynamique inclut certaines caractéristiques qui en font l'équivalent concret et manipulable d'une "particule newtonienne". Elle est caractérisée par sa masse (dont on peut aisément faire abstraction) et par sa vélocité, ou si l'on préfère sa quantité de mouvement *(momentum)*. De plus, tout comme la "particule newtonienne", elle se meut dans un environnement sans friction.

Le micromonde de diSessa constitue un environnement d'apprentissage dans lequel les mouvements de l'objet (ici, la tortue dynamique) sont régis par un sous-ensemble des lois du mouvement qui gouvernent le monde physique. Ces lois sont les suivantes :

La première loi équivaut au *principe d'inertie*, c'est-à-dire à une définition du mouvement en tant qu'état et non en tant que processus : en l'absence de force, un objet maintient son état de repos ou de mouvement uniforme.

La seconde loi spécifie de quelle façon la vitesse change lorsqu'on applique une force d'une certaine grandeur dans une certaine direction.

La première loi correspond au comportement de la tortue lorsqu'aucun coup ne lui est appliqué : si elle est immobile, elle demeure immobile et si elle est déjà en mouvement, elle conserve un mouvement uniforme, c'est-à-dire la même vitesse et la même direction.

La seconde loi correspond à la commande directe "K" (Kick) programmée de façon à modifier l'état de la tortue conformément aux lois du mouvement. La direction du coup est représentée par la direction dans laquelle pointe la tortue. Cette direction peut être contrôlée, indépendamment de celle du mouvement, par les commandes "R" (droite de 30 degrés) et "L" (gauche de 30 degrés). Autrement dit, on peut changer l'orientation de la tortue sans modifier celle du mouvement. La grandeur de la force ou impulsion correspond au nombre de coups (kicks) appliqués. Les mouvements de la tortue sont assimilables aux déplacements d'un vaisseau spatial se mouvant dans un environnement sans friction et les forces (coups) exercées sur la tortue correspondent en quelque sorte à des mises à feu du moteur.

Ce micromonde a été utilisé par diSessa (1982) et White (1983) dans le cadre de recherches concernant le rôle de la connaissance "naïve" dans l'apprentissage de certains aspects centraux des lois du mouvement. La tâche proposée par diSessa (1982) consistait à diriger le mouvement de la tortue, à l'aide des commandes "K", "L" et "R", de façon à frapper une cible située à 45 degrés par rapport à la position initiale de la tortue, avec une vitesse minimale au moment de l'impact. L'analyse "génétique" de cette tâche amène diSessa à constater que la succession des stratégies adoptées par les sujets traduit une compréhension implicite croissante de la tortue newtonienne. Cette compréhension se manifeste notamment par le passage d'anticipations aristotéliciennes, qui sont contredites par le comportement de la tortue, à des stratégies intuitives beaucoup plus proches de la dynamique newtonienne. L'auteur observe également, qu'en dépit de "théories" incorrectes, les étudiants développent des stratégies alternatives qui leur permettent d'accéder à une maîtrise "pratique" de la tortue dynamique, sans posséder une connaissance formelle des lois qui régissent son mouvement.

White (1983) a proposé divers objectifs avec le "jeu de la cible" de diSessa en s'appuyant sur une étude préalable des principales difficultés associées à la compréhension des effets de la force sur le mouvement d'un objet. Ces objectifs consistaient à

essayer de frapper une cible située à différents endroits sur l'écran par rapport à la position initiale de la tortue. L'objectif de ces jeux était de focaliser l'attention des sujets sur divers aspects de la dynamique newtonienne considérés comme sources de difficultés. Ces tâches, axées essentiellement sur la réussite pratique, ont permis de clarifier les types de difficultés reliées au contrôle de la tortue dans ce contexte phénoménologique particulier. White observe en particulier que le fait de ne pas avoir recours à une représentation "vectorielle" de la force et du mouvement accroît les difficultés des étudiants. En effet, ceux-ci ne tiennent pas compte de l'interdépendance de la vitesse et de la direction, ce qui rend particulièrement difficile l'interprétation des effets de la force sur le mouvement dans les situations faisant intervenir la composition de deux dimensions (c'est-à-dire lorsque la direction du coup diffère de celle du mouvement de la tortue). diSessa (1986) fait cependant remarquer que la projection phénoménologique que l'on rencontre dans le "jeu de la cible" laisse de côté quelques idées importantes à propos des lois du mouvement. En particulier, la notion de "composantes" du mouvement et le contrôle indépendant de ces composantes, qui s'avèrent essentiels à la compréhension du mouvement dans un environnement avec gravité, ne sont pas clairement représentés dans la "tortue dynamique".

White et Horwitz (1988) ont conçu, en s'appuyant précisément sur les représentations intuitives des apprenants, un ensemble de 4 micromondes hiérarchisés, de plus en plus complexes. Ceux-ci visaient à faciliter la compréhension de quelques aspects importants de la mécanique newtonienne, en introduisant progressivement, à l'aide de situations simples et concrètes, les principes nécessaires pour analyser des problèmes de mouvements d'un projectile. Les étudiants étaient d'abord confrontés à des situations relativement simples, à partir desquelles ils pouvaient abstraire un certain nombre de "lois", pour ensuite analyser des situations plus complexes à partir de ces lois de base. Les résultats ont montré que, non seulement les étudiants acquièrent, dans ce contexte, une meilleure compréhension de la mécanique newtonienne, mais ils développent également des habiletés à raisonner de façon scientifique. Par exemple, ils se montrent capables de concevoir eux-mêmes des situations permettant d'évaluer les limites d'application d'une loi ou d'évaluer la généralité d'une loi en l'utilisant dans des contextes variés. Les connaissances acquises à travers l'exploration de ces micromondes s'avèrent transférables à d'autres contextes.

2.2. Présentation de notre micromonde

Le micromonde que nous avons conçu illustre les aspects vectoriels de la composition d'une force avec le mouvement d'un objet se déplaçant dans un environnement sans friction. Il s'inspire du programme D.T. (dynaturtle) de diSessa (1982). Comme ce dernier, il est basé sur l'utilisation d'un programme direct, écrit en langage LOGO, qui permet de manipuler un objet en mouvement sur l'écran, en appuyant sur différentes clés du clavier. Tout comme celui de diSessa, notre micromonde peut être défini en fonction de l'état de l'objet, des opérateurs permettant de modifier cet état et des transformations variées pouvant résulter de l'utilisation de ces opérateurs. La tortue dynamique est ici remplacée par une balle en mouvement. Celle-ci n'a donc pas d'orientation indépendante de celle de son mouvement. On fait également abstraction de la masse de l'objet.

- l'état initial de l'objet est caractérisé par la vitesse et l'orientation initiales de la balle avant qu'aucune action ne soit exercée sur elle;
- les opérateurs permettant de modifier cet état sont les coups de grandeurs et d'orientations variées que l'on peut exercer sur la balle à un instant donné;
- les transformations correspondent aux changements de vitesse et/ou d'orientation que produisent les coups de grandeurs et d'orientations variées sur des mouvements de différentes vitesses et orientations.

Deux aspects essentiels distinguent notre micromonde de celui utilisé par diSessa (1982) et White (1983). Le premier réside dans la possibilité d'avoir accès à trois systèmes distincts correspondant à trois façons différentes de manipuler le mouvement. Le second est constitué par l'affichage des paramètres (grandeur et orientation du coup et vitesse et orientation du mouvement) sur l'écran.

2.2.1 Organisation du micromonde

L'organisation du micromonde comprend trois systèmes simulant différentes façons de modifier la vitesse et l'orientation de la balle. Ces trois systèmes sont conçus

pour être manipulés indépendamment l'un de l'autre et dans un certain ordre. On peut passer directement d'un système à l'autre à l'aide des commandes suivantes : "CTRL 1" permet de charger, dans la mémoire de l'ordinateur, le premier système (VITESSES ET ORIENTATIONS); "CTRL 2" charge le second système (FLÈCHES) et "CTRL 3" charge le troisième système (COUPS).

La Figure 1 représente l'organisation du micromonde.

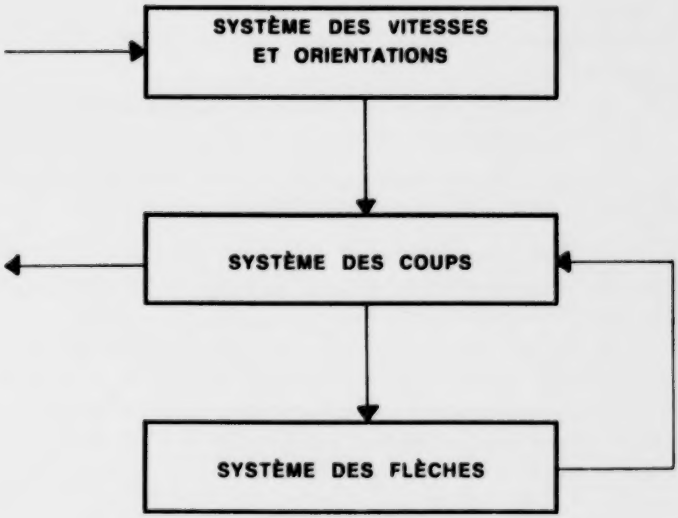


Figure 1

2.2.2 Description et fonctionnement de chacun des systèmes

A) Le système des vitesses et orientations

Situation de départ

La Figure 2 représente la situation de départ sur l'écran.

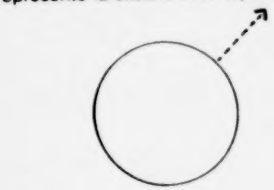


Figure 2

La balle se déplace à une vitesse de 20 dans une orientation de 45 degrés (0 degré correspond, dans ce micromonde, à un mouvement vertical vers le haut). Le nombre de droite, sur l'écran, représente la vitesse de la balle et le nombre de gauche, son orientation.

Clés

On peut modifier indépendamment la vitesse et l'orientation de la balle à l'aide de quatre clés. Deux clés (";" et "") situées à la droite du clavier permettent de modifier la vitesse de la balle :

";" diminue la vitesse d'une valeur de 5;

"" augmente la vitesse d'une valeur de 5.

Deux clés ("A" et "S") situées à la gauche du clavier servent à modifier l'orientation de la balle :

"A" diminue d'une valeur de 5 l'orientation du mouvement;

"S" augmente d'une valeur de 5 l'orientation du mouvement.

La vitesse apparente de la balle, sur l'écran, ne peut pas dépasser 100, même si sa vitesse réelle est supérieure à 100. Dans ce cas, l'indication suivante apparaît à la droite de l'écran : MAXIMUM : 100

B) Le système des flèches

Situation de départ

La Figure 3 représente la situation de départ sur l'écran.

↑ 0

⟶ 0

MOUVEMENT :

- Vitesse : 0

- Orientation :

Figure 3

La balle est immobile et elle est située au centre de l'écran. Cet état est décrit en termes de "MOUVEMENT" ayant une Vitesse nulle (= 0) et dont l'Orientation n'est pas indiquée puisque sa valeur est indéterminée.

Clés

On peut mettre la balle en mouvement ou modifier son mouvement en pressant l'une ou l'autre des quatre flèches du clavier. Ces flèches correspondent à des coups orthogonaux (soit, 0, 90, 180 et 270 degrés) d'égale grandeur (10).

Les flèches horizontales permettent de donner des coups horizontaux vers la droite (90 degrés) ou vers la gauche (270 degrés).

Les flèches verticales permettent de donner des coups verticaux vers le haut (0 degré) ou vers le bas (180 degrés).

Ces coups sont représentés sur l'écran par deux flèches, l'une horizontale, l'autre verticale. Un coup donné à 270 degrés constitue l'inverse (-10) d'un coup donné à 90 degrés (10). Un coup donné à 180 degrés constitue l'inverse (-10) d'un coup donné à 0 degré (10). On peut donc avoir des valeurs positives ou négatives selon le nombre de coups donnés dans ces orientations opposées. La combinaison d'un nombre varié de ces coups orthogonaux permet de produire des mouvements ayant différentes vitesses et différentes orientations (Figure 4)

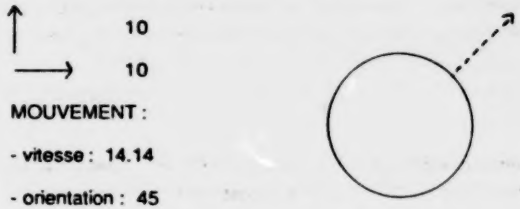


Figure 4

C) Le système des coups

Situation de départ

La Figure 5 représente la situation de départ sur l'écran.

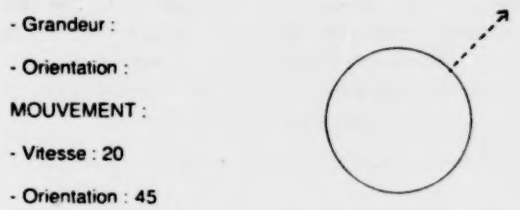


Figure 5

La balle se déplace à une vitesse de 20, dans une orientation de 45 degrés. Cet état est décrit en termes de "MOUVEMENT" ayant une certaine vitesse ("vitesse : 20") et une certaine orientation ("orientation : 45"). Les valeurs associées à la vitesse et à l'orientation décrivent les caractéristiques du mouvement sous une forme quantifiée. Ce mouvement subsiste aussi longtemps qu'aucun coup n'est exercé sur la balle.

Clés

On modifie le mouvement de la balle à l'aide de COUPS successifs dont on doit spécifier la Grandeur et l'Orientation. Cette action est décrite en haut, à la gauche de l'écran, en termes de "COUP" auquel on peut attribuer directement une grandeur ("grandeur : 30", par exemple) et une orientation ("orientation : 270", par exemple). On peut donner des valeurs précises à la grandeur et à l'orientation du coup en appuyant sur les clés suivantes:

"G", suivi d'un nombre quelconque (ex. : 23.46) et RETURN, spécifie la valeur que l'on donne à la Grandeur ("G") du COUP. On a la possibilité de donner des valeurs négatives et des valeurs comportant des décimales. Un coup de grandeur négative correspond à un coup de même valeur absolue mais positive et d'orientation opposée.

"O", suivi d'un nombre quelconque et RETURN, spécifie la valeur que l'on donne à l'Orientation ("O") du COUP. Si l'on donne une valeur négative mais supérieure à -360, le programme calcule et affiche la valeur correspondant à 360 moins la valeur donnée (ex. : -45 devient 315). Si l'on donne une valeur supérieure à 360, par exemple 450, le programme calcule et affiche la valeur correspondant à 450 - 360, soit 90 degrés.

La clé "P" (pour "poussée") permet d'exécuter l'action d'un coup dont la grandeur et l'orientation correspondent aux valeurs préalablement spécifiées. Tant que l'on n'a pas appuyé sur cette clé, aucune action n'est exercée sur la balle et il est encore possible de modifier les valeurs associées à la grandeur et à l'orientation du coup. Lorsqu'on appuie sur la clé "P", apparaît une flèche indiquant l'orientation du coup. La flèche disparaît après quelques instants ce qui indique que le coup est terminé.

La clé "D" permet de revenir instantanément à la situation de départ (vitesse de 20 et orientation de 45).

La clé "C" permet d'immobiliser instantanément la balle, au centre de l'écran.

Lorsque la vitesse atteint une valeur égale ou supérieure à 100, on voit apparaître, à la droite de l'écran, les indications suivantes : MAXIMUM : 100

L'action du coup sur le mouvement de la balle a pour effet de modifier sa vélocité initiale, conformément aux lois du mouvement. Ainsi, selon la grandeur et l'orientation du coup, par rapport à la vitesse et à l'orientation initiales du mouvement, le coup aura pour effet de modifier soit la vitesse, soit l'orientation du mouvement ou les deux à la fois.

En résumé

Le système des vitesses et orientations ne constitue pas une concrétisation adéquate des lois du mouvement puisqu'il permet de manipuler indépendamment la vitesse et l'orientation. Il vise simplement à introduire les principaux concepts (vitesse et orientation) dont il va être question et à familiariser le sujet à la fois avec la manipulation des clés et avec le système de référence (0 degré en haut, 90 degrés à droite, etc.) permettant de situer les orientations sur l'écran.

Le système des flèches correspond à une description du mouvement en termes de "coordonnées relatives à une base". Il consiste à manipuler le mouvement de la balle, immobile au départ, à l'aide de coups horizontaux et verticaux d'égale grandeur. Ceux-ci représentent les vecteurs orthogonaux de base en fonction desquels le mouvement est décrit. Ce système est en principe plus simple que le système des coups pour plusieurs raisons. D'une part, la balle étant immobile au départ, le sujet n'a pas à tenir compte de sa vélocité initiale mais uniquement de la combinaison des coups et de leur relation avec le mouvement de la balle. D'autre part, le choix des actions à effectuer est prévu dans la description même des coups. En effet, le sujet n'a pas à préciser la grandeur du coup puisque celle-ci est constante (10), ni son orientation puisque cette dernière correspond à l'une des quatre orientations orthogonales représentées par les flèches. Agir dans ce système ne nécessite donc pas de définir, à l'aide de valeurs précises, les composantes de l'action (grandeur et orientation du coup) qui vont se combiner aux composantes (vitesse et orientation) du mouvement, mais consiste simplement à combiner des actions déjà définies et à analyser leurs effets.

Dans ce système, le sujet a donc simultanément accès à la description des composantes vectorielles du mouvement et de leur résultante. Ces composantes (horizontale et verticale) sont dissociées dans l'action, puisqu'elles sont manipulées succes-

sivement, mais elles sont reliées au niveau du résultat puisque le fait de changer l'une ou l'autre modifie l'allure générale du mouvement, c'est-à-dire sa vitesse et son orientation. Ce système est conçu de manière à inciter le sujet à se représenter l'orientation du mouvement en termes d'une combinaison de mouvements vers le haut ou vers le bas, vers la droite ou vers la gauche. Il vise à faciliter la découverte d'une "proportionnalité qualitative", c'est-à-dire d'un certain rapport entre l'orientation du mouvement et l'intensité respective des forces (horizontale et verticale) exercées sur la balle, ces forces représentant simultanément les composantes vectorielles du mouvement.

Le système des coups est central puisque l'objectif d'exploration du micromonde est d'amener les sujets à reconstituer, à travers leurs manipulations, les effets variés que peut produire le coup sur le mouvement de la balle, en tenant compte simultanément des caractéristiques du coup (grandeur et orientation) et de celles du mouvement initial (vitesse et orientation). L'une des caractéristiques de notre micromonde, qui le distingue d'ailleurs de celui de diSessa, réside dans le fait que le sujet n'a pas seulement accès à des actions (donner des coups) et à leurs résultats (modifications dans le mouvement apparent de l'objet), mais à une description numérique de ces actions (grandeur et orientation du COUP) et des résultats qu'elles produisent (vitesse et orientation du MOUVEMENT après le coup). Ainsi, ce que l'étudiant manipule, ce ne sont pas seulement des actions (coups), mais des descriptions d'actions (grandeur et orientation) puisqu'il doit donner des valeurs précises à la grandeur et à l'orientation du coup. Ce qu'il doit interpréter, ce ne sont pas seulement des phénomènes apparents (mouvement de la balle sur l'écran), mais une description de ces phénomènes sous une forme quantifiée (valeurs associées à la vitesse et à l'orientation finales de la balle). La notion de "composantes" du mouvement et le contrôle indépendant de ces composantes sont ici clairement représentés par les caractéristiques du coup (grandeur et orientation) et par celles du mouvement (vitesse et orientation).

Ce micromonde définit un ensemble d'actions possibles sur un objet pouvant présenter une variété d'états possibles (mouvements de différentes vélocités). Pratiquement, on peut produire une variété de mouvements, chacun d'eux étant caractérisé par une certaine vitesse et une certaine orientation. De même, on peut exercer une grande diversité de coups possibles, chacun d'eux étant caractérisé par la combinaison d'une certaine grandeur avec une certaine orientation. Bien qu'un tel contexte soit limité par les contraintes mêmes du système, il offre cependant des possibilités de manipulation et d'exploration très variées. Il ne se réduit pas seulement à quelques exemples ou

"illustrations" mais permet de générer une diversité de mouvements illustrant différents aspects des "lois du mouvement". C'est en quelque sorte un "domaine d'exploration" constitué par les situations variées qui peuvent être produites à l'aide des commandes ou opérateurs définis dans chacun des systèmes. L'intérêt d'un tel environnement réside précisément dans la diversité des situations qu'il permet de générer et dans le fait que le sujet ne se contente pas d'observer ces situations, mais les produit lui-même par l'intermédiaire des actions qu'il choisit d'effectuer. L'exploration du micromonde donne ainsi accès à une diversité d'expériences à partir desquelles les sujets peuvent abstraire des connaissances relatives aussi bien à leurs propres actions qu'aux transformations multiples que ces actions produisent sur le mouvement.

Ce micromonde est conçu dans le but de servir de support à la conceptualisation des actions et des phénomènes qui y sont représentés. Il incarne, sous une forme pour ainsi dire "épurée", quelques aspects centraux des lois du mouvement et plus particulièrement de la composition des vecteurs. En effet, il fait abstraction de divers facteurs tels que les forces de friction, l'attraction gravitationnelle, la masse de l'objet, qui sont souvent sources de difficultés. Par ailleurs, il tente de représenter, sous une forme claire et précise, les actions (coups) et les phénomènes (modifications du mouvement) dont on veut faciliter la compréhension. Il constitue, en quelque sorte, une organisation de l'objet sur lequel porte l'apprentissage (concept de vecteur et opérations de composition des vecteurs). Cet environnement d'apprentissage interactif est structuré de façon à permettre la "décomposition" ou "modularisation" d'une connaissance complexe en composantes plus simples qui peuvent être maîtrisées séparément, processus inhérent à la construction même des connaissances. L'apprentissage de certains aspects centraux des lois du mouvement dans ce contexte, en particulier de ses aspects vectoriels, va consister à abstraire, à partir d'expériences avec des situations variées et plus ou moins complexes, les principaux éléments de connaissance nécessaires pour parvenir à manipuler correctement le mouvement de la balle ou prévoir les effets des coups.

2.2.3 Champ conceptuel visé

Notre micromonde se rattache à un certain "champ conceptuel" puisqu'il est conçu dans le but de fournir un support concret et manipulable à l'élaboration d'une

représentation vectorielle des effets de la force sur le mouvement d'un objet, à travers l'exploration des actions et phénomènes qui y sont représentés. En effet, la façon dont les caractéristiques du coup se combinent à celles du mouvement initial pour produire le mouvement final est liée au concept de vecteurs.

Les vecteurs sont une façon de considérer grandeur (ou vitesse) et orientation comme une seule et même entité. Ils traduisent l'interdépendance de la vitesse et de l'orientation du mouvement de même que l'interdépendance de la grandeur et de l'orientation du coup. Un vecteur est un "segment de droite orienté" dont les principales caractéristiques sont la longueur et l'orientation. On peut représenter un vecteur par une flèche ayant une longueur et une orientation déterminées. La longueur du vecteur correspond ici à la vitesse du mouvement (ou à la grandeur du coup) et l'orientation du vecteur correspond à l'orientation du mouvement (ou à celle du coup). De ce point de vue, coup et mouvement initial constituent des "quantités" (vecteurs) équivalentes qui peuvent se composer. Le coup se traduit en une composante de vélocité se combinant à la vélocité initiale du mouvement. Ainsi, la notion vectorielle de vélocité, qui intègre les caractéristiques de vitesse (ou de grandeur) et d'orientation, constitue une entité centrale dans le choix des interventions ou dans l'anticipation des résultats puisque l'on ne peut correctement prévoir l'effet du coup sans tenir compte des caractéristiques initiales du mouvement, c'est-à-dire de sa vitesse et de son orientation. Il existe en effet une interdépendance de la vitesse et de l'orientation : le changement de vitesse dépend de l'orientation de l'impulsion tout comme le changement d'orientation dépend de la vitesse initiale du mouvement. Pour comprendre que le changement de vitesse est affecté par l'orientation de la force et que le changement d'orientation dépend aussi de la vitesse du mouvement, il faut avoir recours, au moins de façon implicite, à une représentation vectorielle. Parvenir à relier le mouvement final à la fois au coup et au mouvement initial, c'est donc essentiellement composer des vecteurs. En effet, l'action du coup sur le mouvement de la balle se traduit par l'addition de deux vecteurs, coup et mouvement initial, produisant un troisième vecteur, le mouvement final, qui constitue la résultante de la composition des deux précédents.

Le concept de vecteur constitue donc un outil conceptuel puissant permettant d'unifier, au sein d'une seule et même représentation, les concepts de vitesse et d'orientation. Le recours à cet outil peut grandement faciliter la compréhension des effets de la force sur le mouvement, en particulier dans les situations où il s'agit de composer une force avec un mouvement initial d'orientation différente. Cependant, il y a peu de

support concret à ce concept, si ce n'est sa représentation géométrique (flèche orientée) qui demeure essentiellement statique. De plus, cette représentation géométrique est relativement abstraite et engendre parfois certaines confusions à propos de ce que représente la longueur du vecteur puisqu'un même formalisme est utilisé pour représenter aussi bien la force ou la vitesse que le déplacement (White, 1983). Par ailleurs, si d'un point de vue formel la composition de deux forces est équivalente à la composition d'une force avec une vélocité (mouvement) initiale, diSessa (1980) observe que plusieurs sujets ne considèrent pas ces situations comme équivalentes. Force et mouvement constituent, d'un point de vue intuitif, des "objets" conceptuellement différents de sorte que même les sujets qui connaissent le formalisme des vecteurs n'y ont pas nécessairement recours de façon appropriée lorsqu'il s'agit de composer une force avec un mouvement initial.

On peut concevoir l'apprentissage du concept de vecteur, dans le contexte de notre micromonde, comme le résultat de l'abstraction et de la mise en relation des éléments de connaissance pertinents à la compréhension des changements de vitesse et d'orientation, dans les différentes situations que le micromonde permet de générer. Dans un tel contexte, la notion de vecteur n'est pas préalable à la manipulation des caractéristiques du coup et à l'interprétation des résultats. Elle constitue d'abord une connaissance "pratique" résultant des manipulations et des observations variées auxquelles donne accès le micromonde. En d'autres termes, le sujet ne débute pas par un apprentissage formel de la notion de vecteur (combinaison de flèches orientées représentant mouvement initial et coup) pour l'appliquer ensuite aux différentes situations auxquelles il est confronté. Il en fait d'abord l'expérience dans un environnement d'exploration où il est directement en contact avec les phénomènes que cette notion représente. L'accent est mis davantage sur la connaissance pratique que sur la compréhension conceptuelle et sur la représentation qualitative des phénomènes plutôt que sur leur quantification précise.

CHAPITRE 3

ANALYSE DU MICROMONDE

Ce qui est peut-être fondamental pour l'intelligence humaine comme pour l'intelligence artificielle, c'est le principe de (...) la modularité épistémologique. (...) L'important n'est pas de savoir si le cerveau ou l'ordinateur fonctionnent en discontinu, mais si les connaissances peuvent être modularisées.

(...) Quand le savoir peut être fractionné en "petites bouchées intelligibles", il est plus facile à transmettre, à assimiler, à reconstruire (...). Notre résolution de parvenir à communiquer se traduit non seulement par notre résolution de fractionner les connaissances en modules, ce qui facilite leur transmission, mais encore par notre recherche d'un langage pour des domaines tels que la physique et les mathématiques, qui ont pour essence même la communication entre des entités construites.

(Papert, 1980, p. 213)

Qualitative understanding of basic mechanisms forms an essential core to understanding the physical world that transcends any particular formal means expression (equations, etc.).

(diSessa, 1986, p. 221)

Le présent chapitre porte sur l'analyse théorique de la tâche proposée à nos sujets et ce, principelement en termes de compétence visée. Cette analyse s'appuie sur deux démarches préalables :

a) Notre propre exploration systématique du micromonde. Cette exploration nous a permis de préciser nos représentations initiales et nous a amenée à catégoriser les différentes situations possibles à l'intérieur du micromonde, à l'aide d'une méthode de contrôle des variables.

b) Les données recueillies lors d'une pré-expérimentation. Celle-ci a consisté à travailler l'activité avec des étudiants de niveau cegep et universitaire, ayant ou non une formation antérieure en physique, dans le but d'identifier les éléments de connaissance impliqués dans la tâche et les types de difficultés rencontrées en fonction des situations.

L'analyse que nous proposons constitue en quelque sorte le résultat d'une formalisation de notre propre démarche d'apprentissage à partir de notre exploration du

micromonde et des données recueillies lors de la pré-expérimentation. Cette analyse comporte essentiellement deux parties.

La première vise à préciser en quoi consiste l'interaction avec le micromonde en identifiant ses principales caractéristiques et en établissant une distinction entre ce qui relève du micromonde comme tel, c'est-à-dire des informations présentes dans la tâche *(observables)*, et ce qui relève plutôt d'une interprétation de la part du sujet, dans la mesure où cela nécessite une construction *(coordinations)* à partir de ses connaissances préalables et des éléments d'informations présents dans la tâche.

La seconde partie a pour but d'identifier les divers éléments et processus de connaissance (schèmes) auxquels fait appel la compréhension des actions et des phénomènes qui sont incarnés dans le micromonde. Elle tente d'en fournir une représentation procédurale qui tienne compte non seulement des connaissances impliquées et de leur organisation dynamique, mais de leur utilisation par un sujet compétent. Nous faisons également ressortir le caractère essentiellement qualitatif de la compétence visée.

La présente analyse a pour but de guider notre intervention pédagogique en nous aidant à mieux cerner, d'une part, la nature des connaissances qui peuvent être acquises à travers l'activité d'apprentissage proposée aux sujets, d'autre part, les types d'obstacles que ces derniers sont susceptibles de rencontrer en rapport avec les différentes catégories de situations que le système permet de générer.

3.1 Description de l'activité

3.1.1 Composantes de l'interaction

Notre micromonde présente divers éléments d'information relatifs à l'état de l'objet (la balle), aux actions qui peuvent être effectuées sur cet objet et à leurs résultats. Parmi ces divers éléments d'information, certains peuvent être assimilables aux connaissances préalables du sujet, d'autres non, selon son niveau de compétence. L'interaction du sujet avec le micromonde ne dépend donc pas seulement des possibilités de chacun des systèmes. Certaines connaissances vont être évoquées au cours de ces interactions. Les aspects d'une situation ou les éléments d'information dont le sujet tient compte et la

façon dont il les utilise dépendent étroitement de sa représentation intiale des effets du coup sur le mouvement de la balle. L'interaction du sujet avec le micromonde peut se résumer essentiellement en termes d'actions sur l'objet, de résultats de ces actions et des constatations et mises en relation que le sujet effectue à partir de ses propres actions et de leurs résultats.

Actions

Dans le système des vitesses et orientations, les actions du sujet consistent à appuyer sur l'une ou l'autre des quatre clés qu'on lui a indiquées, sans savoir au préalable à quoi correspondent ces actions. Celles-ci, quoique très simples, devront être inférées à partir de leurs résultats sur l'objet, c'est-à-dire les changements de vitesse et d'orientation de la balle de même que les modifications des valeurs numériques. Dans le système des flèches, ces actions consistent à combiner des coups successifs de même grandeur (10) et dont l'orientation correspond à l'une ou l'autre des 4 orientations orthogonales représentées par les flèches (horizontale et verticale) et les signes (+ ou -) associés aux valeurs. Enfin, dans le système des coups, le sujet peut agir sur l'objet en mouvement en donnant des coups dont il doit lui-même spécifier la grandeur et l'orientation en leur attribuant une certaine valeur. Les manipulations qu'il va effectuer dépendent en partie des connaissances qu'il évoque en rapport avec le contexte qui lui est proposé. Elles peuvent être liées à des objectifs plus ou moins définis, par exemple, essayer d'obtenir un résultat précis, observer l'effet de certaines actions, etc. Ces actions sont susceptibles de donner lieu à des anticipations variées et plus ou moins précises quant aux effets du coup sur le mouvement de la balle, anticipations qui peuvent être contredites ou au contraire confirmées par le comportement de l'objet.

Résultats

Les actions effectuées par le sujet ont pour effet de modifier l'état de l'objet. Elles produisent des résultats observables. Ceux-ci se manifestent à la fois par des modifications dans le mouvement apparent de la balle sur l'écran et par un changement des valeurs associées à la vitesse et à l'orientation du mouvement. Ces modifications, liées à l'action, fournissent au sujet des informations sur les résultats de ses manipulations. Elles constituent des "feedbacks" qui viennent confirmer ou infirmer ses anticipations et elles sont susceptibles de l'amener à rectifier ses stratégies pour les adapter à la situation.

Constatations et mises en relations

Le sujet peut faire différentes observations à propos des actions qu'il exerce sur l'objet et de leurs résultats sur le mouvement de la balle. Il peut également établir certaines relations entre ces divers éléments d'information dans le but de comprendre ou d'expliquer les résultats observés. Ces observations et mises en relations dépendent à la fois de ce qu'il est en mesure d'assimiler en fonction des connaissances préalables dont il dispose et des éléments d'information provenant du micromonde.

Les interactions sont sources d'une confrontation entre les connaissances ou représentations intiales du sujet et les aspects des lois du mouvement qui sont incarnés dans le micromonde. Elles constituent une occasion pour l'apprenant de tester ses connaissances préalables à travers leur utilisation et par conséquent d'évaluer leur pertinence ou leur adéquation par rapport aux différentes situations auxquelles il est confronté. Les expériences que le sujet peut faire dans ce contexte ne se réduisent pas à observer des choses mais à agir sur l'objet pour modifier son état et à abstraire des informations à partir aussi bien de ses propres actions que de leurs résultats. Les apprentissages issus de ces expériences variées vont consister essentiellement à rectifier ses connaissances ou représentations initiales pour les ajuster à différentes situations et rendre possible l'intégration de nouveaux éléments d'information.

3.1.2 Description de l'interaction en termes d'observables et de coordinations

On peut décrire l'état de l'objet, les actions que l'on peut faire et les résultats de ces actions, c'est-à-dire les modifications variées imposées au mouvement, en termes d'*observables* et de relations ou *coordinations* variées entre ces divers observables. Ces notions, avons-nous déjà dit, sont empruntées à la théorie de l'équilibration de Piaget (1975). Elles permettent, notamment, d'introduire une distinction entre le niveau des constatations (ce que l'on observe) et celui des inférences (ce que l'on déduit à partir de nos observations).

La notion d'"observables" se réfère à *"ce que l'expérience permet de constater par une lecture immédiate des faits eux-mêmes"* (Piaget, 1975, p. 50). Il va de soi que la constatation elle-même n'est jamais complètement indépendante des connaissances préalables du sujet. Néanmoins, le micromonde présente certains éléments

d'information, qui sont directement "constatables" et peuvent servir de support à la construction d'une interprétation. En ce sens, les *observables* se réfèrent aux informations présentes dans le micromonde sans préjuger en rien de l'utilisation que le sujet peut en faire et de la signification qu'il leur donne. Celui-ci peut très bien centrer son attention sur certains observables seulement et en négliger d'autres (c'est ce que Piaget appelle, métaphoriquement, un *refoulement* des observables), de même qu'il peut les déformer ou encore les considérer isolément plutôt que de les mettre en relation les uns avec les autres.

Ce que nous décrivons en termes d'observables correspond donc aux éléments ou composantes de la tâche qui sont accessibles à l'observation par opposition aux relations entre ces données qui ne sont pas directement observables. En effet, ces relations sont le produit d'une "coordination". Elles impliquent donc, de la part du sujet, une activité "coordonnatrice" consistant à relier entre eux divers éléments d'information pour en tirer un certain nombre d'inférences. Ainsi, dans le système des coups par exemple, on peut "voir" que la grandeur du coup est de 20 et "voir" que la vitesse finale du mouvement est de 20. Mais dire que la grandeur du coup "détermine" la vitesse du mouvement ou encore que la vitesse finale "a la même valeur que" la grandeur du coup, c'est mettre en relation des observables puisque la "constatation" d'une égalité ne peut résulter que d'une comparaison, c'est-à-dire d'une mise en relation entre des termes distincts.

En somme, les relations ne sont pas, comme telles, données sous une forme directement observable. Elles doivent être reconstruites par le sujet lui-même à partir de sa propre activité et de ses résultats sur l'objet. Ces "coordinations" vont consister à insérer les divers observables pertinents à une situation dans des "systèmes de relations" (ou schèmes) qui permettent de faire des inférences, c'est-à-dire de prédire ou de déduire, à partir de certains éléments d'information ("observables"), des aspects de la situation qui n'ont pas encore été ou ne peuvent être directement perçus. Elles dépendent étroitement des "outils conceptuels" et des connaissances préalables dont dispose le sujet pour assimiler l'information. Interpréter une situation va donc consister à coordonner les observables pertinents à cette situation en les intégrant à une certaine représentation des effets du coup sur le mouvement de la balle.

Dans ce micromonde, on peut identifier, pour chacun des systèmes, des "observables" et des "coordinations".

Dans le système des vitesses et orientations, les observables sont relatifs :

- au mouvement apparent de la balle avant et après chacune des actions dissociées qu'il est possible d'effectuer;
- aux modifications des valeurs numériques sur l'écran.

Dans le système des flèches de même que dans le système des coups, les observables sont relatifs :

- au mouvement apparent de la balle sur l'écran, avant et après le coup (état initial et état final);
- aux valeurs numériques associées à la vitesse et à l'orientation initiales du mouvement (description de l'état initial);
- aux valeurs numériques associées à chacune des flèches ou encore à la grandeur et à l'orientation du coup (description de l'action);
- aux valeurs numériques asssociées à la vitesse et à l'orientation finales du mouvement (description des résultats).

Les coordinations correspondent aux transformations (ou opérations) permettant de passer d'un état initial à un état final. Elles concernent donc les liaisons causales entre les actions et leurs résultats. Ces liaisons sont relativement simples et directes dans le système des vitesses et orientations. Elles sont déjà un peu moins évidentes dans le système des flèches. Elles peuvent s'avérer nettement plus complexes dans le système des coups, notamment lorsqu'ils s'agit de relier entre elles plusieurs variables distinctes, possédant toutes des valeurs différentes.

Chacune des situations possibles à l'intérieur du micromonde peut donc être décrite en termes:

- d'observables pertinents, c'est-à-dire les aspects de la situation dont il faut tenir compte et les "données" numériques qui leur sont associées et;
- de coordinations ou relations entre ces divers observables : celles-ci correspondent aux types de modifications que peut produire le coup en fonction des relations entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial.

En somme, les observables correspondent aux éléments d'information que le sujet peut abstraire de ses expériences avec l'objet. Les coordinations sont constituées par les relations que le sujet établit entre ces divers éléments d'information, à partir de ses connaissances préalables. Au fur et à mesure que le sujet établit de nouvelles coordinations, il devient apte à interpréter des informations qui n'étaient pas assimilables auparavant. En d'autres termes, il accède à de nouveaux observables qui seront eux-mêmes la source de coordinations nouvelles.

3.2 Représentation de la compétence en termes de schèmes

La compétence visée désigne l'ensemble des connaissances associées à la tâche. Elle doit être envisagée du point de vue d'un système qui l'utilise et en rapport avec le contexte dans lequel elle intervient. Elle se réfère à ce qu'il y a à comprendre em rapport avec les différentes situations possibles à l'intérieur du micromonde, aux connaissances rattachées à cette compréhension et à la façon dont ces connaissances vont se manifester chez un sujet qui les possède. On peut décrire cette compétence du point de vue de ce qu'un sujet pourrait faire ou dire en réponse à la question suivante :

"Que se passe-t-il lorsqu'on donne à la balle un coup d'une certaine grandeur dans une certaine orientation ?"

Cette compétence va se manifester essentiellement par la capacité :

- de tenir compte du mouvement initial dans la détermination ou l'anticipation des effets du coup et, par conséquent, de considérer les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial dans leurs interrelations;
- de décomposer la situation en possibilités et de structurer l'ensemble de ces possibilités en différenciant les cas simples des cas plus complexes;
- d'effectuer des approximations qualitatives de la vitesse et de l'orientation finales à partir des valeurs numériques associées au mouvement initial et au coup;
- éventuellement, de raisonner sur une représentation graphique de la composition des caractéristiques du coup avec celles du mouvement initial.

L'activité proposée aux sujets fait appel à une variété de connaissances de divers niveaux. Pour pouvoir anticiper les effets du coup sur le mouvement de la balle ou expliquer les résultats de ses actions, le sujet doit établir les relations (ou coordinations) appropriées entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial (observables). Or, ce ne sont pas les mêmes relations qui interviennent dans toutes les situations et ce ne sont pas non plus les mêmes relations qui rendent compte des changements de vitesse et des changements d'orientation. Une même relation peut être incarnée de façons différentes selon les situations tout comme une même situation peut concrétiser simultanément plusieurs relations distinctes. De plus, chaque situation présente au moins quelques caractéristiques particulières qui la distingue des autres. Il va de soi que le sujet compétent ne possède pas de représentation pour chaque situation ou de solution pour chaque problème auquel il peut être confronté.

Aussi, la compétence n'est-elle pas un état. Elle consiste plutôt en un processus d'activation des connaissances pertinentes. Ce processus va se manifester par la capacité de construire différentes représentations des effets du coup sur le mouvement de la balle en fonction des différentes situations que le système permet de générer et d'opérer à l'intérieur de ces représentations, c'est-à-dire de choisir les procédures adaptées à la situation et aux buts visés. Cela implique l'habileté à discriminer les informations pertinentes, les hiérarchiser, distinguer ce qui est essentiel de ce qui est accessoire, faire appel à des éléments de connaissance pertinents, les organiser, etc.

On peut représenter cette compétence en termes de schèmes. Nous utilisons la notion de schème (diSessa, 1986; Lawler, 1985; Minsky, 1986; Papert, 1980) pour désigner les divers éléments de connaissance impliqués dans la compréhension d'une situation ou d'un ensemble de situations, leur organisation dynamique et la structure de contrôle qui en gère l'évocation et l'utilisation appropriées. Un schème n'est donc pas réductible à une simple addition d'éléments de connaissance puisqu'il suppose leurs interrelations au sein d'une structure dynamique. L'analyse de la tâche nous a amenée à identifier un certain nombre de schèmes associés à la compétence. Ces schèmes correspondent à différentes représentations que l'on peut se faire des changements de vitesse et d'orientation en rapport avec différentes situations. Ils correspondent à la fois à des façons de décrire ces situations et de raisonner sur leurs composantes. Ils intègrent, dans leur description, une différenciation des cas simples ou complexes qui peuvent présenter un intérêt particulier. Ces schèmes sont les suivants :

- le schème unidimensionnel;

- le schème de la moyenne;
- le schème de l'écart;
- le schème d'addition graphique des vecteurs;
- le schème de composition vectorielle.

3.2.1 Description de chacun des schèmes

Schème unidimensionnel

Le schème unidimensionnel correspond à la représentation des changements de vitesse et d'orientation dans les situations unidimensionnelles, c'est-à-dire lorsque l'orientation du coup (Oc) et celle du mouvement initial (Oi) sont sur une même droite. Il s'applique aux situations dans lesquelles le coup est donné dans la même orientation que le mouvement initial ou dans l'orientation qui lui est opposée. Il consiste à se représenter la situation en termes de deux forces sur une même dimension qui s'ajoutent ou au contraire s'opposent. Ces forces s'ajoutent lorsqu'elles vont dans le même sens, soit lorsque le coup est donné dans la même orientation que le mouvement initial et elles s'opposent lorsque le coup est donné en direction opposée à celle du mouvement initial. Ce schème fait appel à divers éléments de connaissance tels que l'addition, la soustraction, la réversibilité de l'action, etc... Il permet d'effectuer des anticipations précises de la vitesse et de l'orientation finales à partir des valeurs associées au mouvement initial et au coup. Le tableau 1 (page suivante) présente les principales relations qualitatives en jeu dans le schème.

Tableau 1: Principales relations qualitatives en jeu dans le schème unidimensionnel

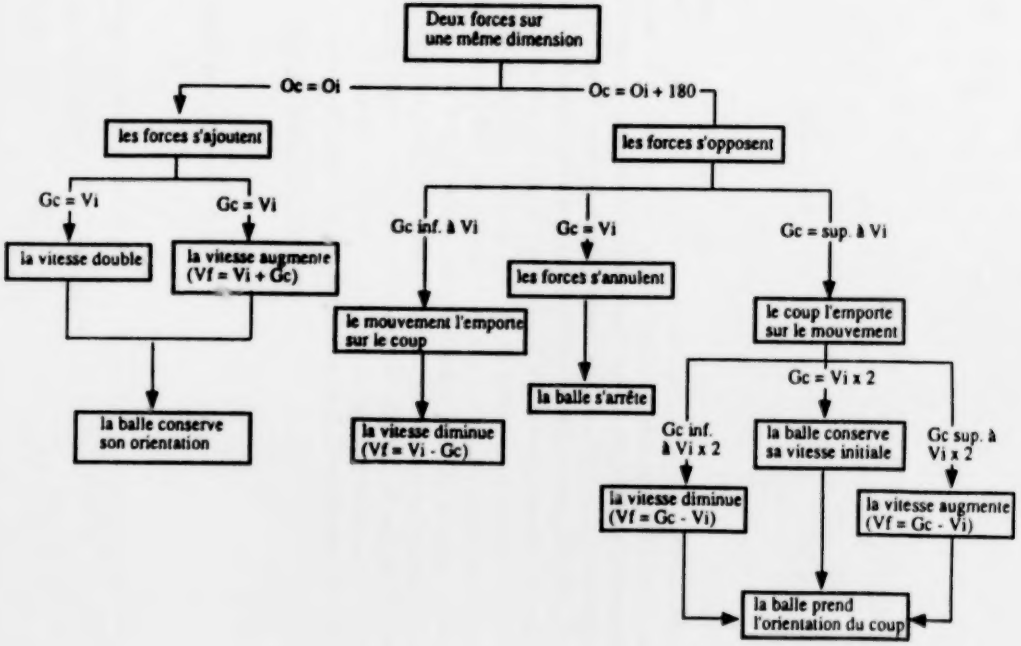
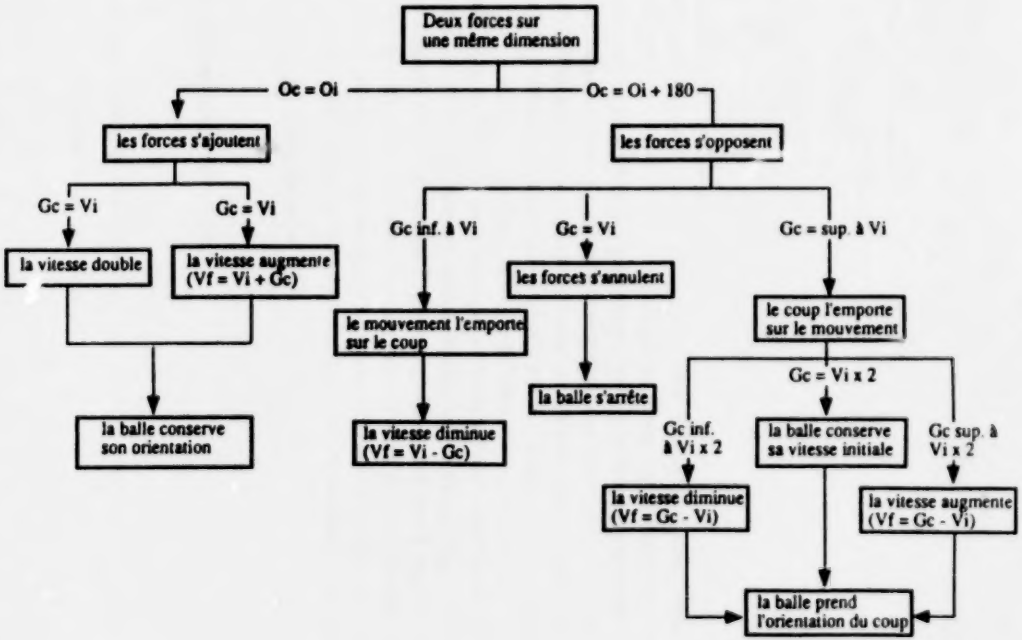


Tableau 1: Principales relations qualitatives en jeu dans le schème unidimensionnel



a) Cas où Oc est identique à Oi

Lorsque l'orientation du coup (Oc) est la même que celle du mouvement initial (Oi) on peut faire les prévisions suivantes:

- l'orientation initiale (Oi) ne change pas puisqu'on reste dans la direction du mouvement, soit Of = Oc = Oi;
- la vitesse initiale (Vi) augmente d'une valeur égale à la grandeur du coup (Gc), soit : Vf = Vi + Gc. Un coup de même grandeur que la vitesse initiale aura donc pour effet de doubler celle-ci.

b) Cas où Oc est opposée à Oi

On peut également prévoir la vitesse et l'orientation finales lorsque le coup est donné dans l'orientation opposée à celle du mouvement initial. Il y a alors différentes "possibilités" selon la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale.

- si la grandeur du coup est inférieure à la vitesse initiale, le coup ne fait que diminuer la vitesse de la balle sans modifier son orientation. On peut évaluer la vitesse finale avec précision en diminuant la vitesse initiale d'une valeur égale à la grandeur du coup soit : Vf = Vi - Gc;
- si la grandeur du coup est supérieure à la vitesse initiale, le coup a pour effet d'envoyer la balle dans la direction opposée à celle du mouvement initial. L'orientation finale correspond alors à l'orientation du coup et la vitesse finale se calcule en faisant la différence entre la grandeur du coup et la vitesse initiale, soit : Vf = Gc - Vi. On peut également constater qu'un coup de grandeur négative constitue l'équivalent d'un coup de direction opposée.

Les cas particuliers intéressants sont les suivants :

- quand les deux forces sont de même grandeur, soit Gc = Vi, mais de sens inverse, soit Oc = Oi + 180, elles s'annulent et la balle s'arrête.
- si l'on donne un coup deux fois plus grand que la vitesse initiale en direction opposée à celle du mouvement, la vitesse se conserve et seule l'orientation change. La vitesse finale sera donc inférieure ou supérieure à la vitesse initiale selon que la grandeur du coup est inférieure ou supérieure au double de la vitesse initiale.

Ces situations correspondent, dans le système des flèches, aux cas où l'on combine des coups d'orientations opposées, par exemple, 0 et 180 degrés ou 90 et 270 degrés. L'orientation du mouvement correspond à celle des deux orientations dans la-

quelle on a donné le plus grand nombre de coups et la vitesse du mouvement est donnée par la différence entre les valeurs représentant la somme des coups donnés dans chacune de ces orientations. Par exemple, si l'on a donné 6 coups à 90 degrés et 3 coups à 270 degrés, l'orientation du mouvement est de 90 degrés et sa vitesse est de 30, soit (6 x 10) - (3 x 10). Si l'on donne le même nombre de coups dans chacune de ces orientations l'objet, qui était immobile au départ, redeviendra immobile.

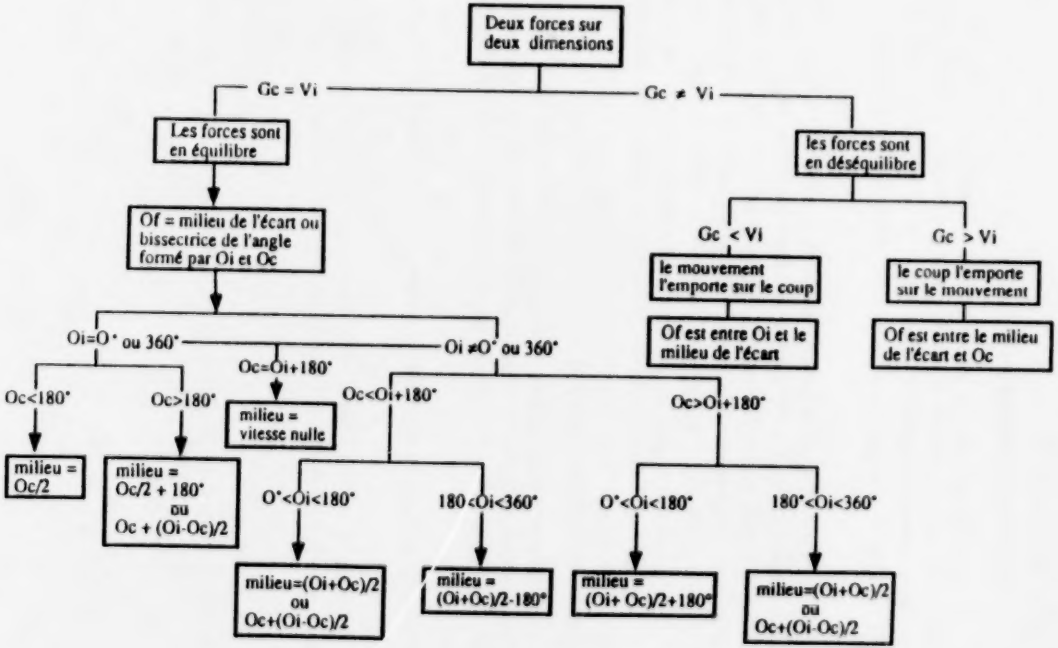
Schème de la moyenne

Le schème de la moyenne correspond à une description des changements d'orientation dans les situations bidimensionnelles, c'est-à-dire lorsque l'orientation du coup est différente de (mais non opposée à) celle du mouvement initial. Il consiste à se représenter coup et mouvement initial comme deux forces, sur deux dimensions, qui peuvent être en équilibre ou en déséquilibre. Elles sont en équilibre lorsque coup et mouvement initial agissent également. L'équilibre correspond au cas où la grandeur du coup (Gc) est égale à la vitesse initiale (Vi). Puisqu'aucune des deux forces ne l'emporte sur l'autre, l'orientation finale se situe au milieu de l'écart ou de l'angle formé par l'orientation initiale et par celle du coup, soit à mi-chemin de ces deux orientations. Elles sont en déséquilibre si l'une des deux l'emporte sur l'autre, soit dans les cas où la grandeur du coup est différente de la vitesse initiale. L'orientation finale se rapproche alors de celui des deux, coup ou mouvement initial, qui est le plus "fort". Si la grandeur du coup est supérieure à la vitesse initiale, le coup "emporte" le mouvement dans sa propre direction. L'orientation finale va donc se rappprocher davantage de celle du coup que de l'orientation initiale de la balle. Inversement, si c'est la vitesse initiale qui est supérieure à la grandeur du coup, le coup n'est pas assez fort pour modifier considérablement l'orientation de la balle et celle-ci conserve davantage de sa propre orientation tout en étant modifiée par la direction du coup.

Ce schème fait appel à divers éléments de connaissances tels que les notions d'angle, de moyenne, d'écart à la moyenne, etc. Il suppose également l'intervention d'une certaine proportionnalité qualitative ou logique. Il permet de prévoir l'orientation finale avec exactitude quand la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale et approximativement lorsqu'elle est différente de la vitesse initiale. Son application à des situations variées peut conduire à identifier quelles sont les façons les plus simples de mesurer l'écart ou de calculer la moyenne selon les situations.

Le tableau 2 (page suivante) présente les principales relations qualitatives en jeu dans le schème de la moyenne.

Tableau 2: Principales relations qualitatives en jeu dans le schème de la moyenne



a) Cas où Gc est égale à Vi

Quand la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, on peut prévoir l'orientation finale avec exactitude. En effet, le milieu de l'écart, autrement dit la bissectrice de l'angle formé par l'orientation initiale (Oi) et par celle du coup (Oc), correspond mathématiquement à la moyenne des valeurs associées à ces deux orientations, soit Oi et Oc.

Le cas le plus simple est celui dans lequel l'orientation initiale est à 0 degré, celle du coup étant inférieure à 180 degrés. En effet, il suffit alors de diviser l'orientation du coup par deux pour trouver l'orientation finale de la balle, soit Of = Oc/2 (Figure 6a). Cette relation est particulièrement "évidente" lorsque l'orientation du coup est symétrique à celle du mouvement initial (90 degrés). Elle apparaît clairement dans le système des flèches où l'on combine uniquement des coups orthogonaux (soit 0 ou 360 et 90, 90 et 180, 180 et 270, 270 et 0 ou 360) : lorsque le nombre de coups donnés dans chacune de ces orientations est le même, l'orientation du mouvement se situe à mi-chemin de ces deux orientations symétriques, soit à 45, à 135, à 225 ou à 315 degrés.

Quand l'orientation initiale se situe entre 0 et 180 degrés (par exemple : Oi = 45) et que l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup est inférieur à 180 degrés (par exemple : Oc = 135) (Figure 6b), on peut calculer l'orientation finale de deux façons:

- en faisant la moyenne de l'orientation initiale et de celle du coup (soit Of = (Oi + Oc)/2) ou encore,
- en mesurant la moitié de l'écart formé par ces deux orientations et en l'ajoutant à l'orientation initiale (soit Of = Oi + ((Oc - Oi)/2)

Figure 6

Certains cas sont un peu plus problématiques, notamment lorsque l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup est supérieur à 180 degrés (soit Oc plus grande que Oi + 180) si on le calcule à partir de l'orientation initiale, soit dans le sens des aiguilles d'une montre. Par exemple, quand Oi = 0 et Oc = 230 ou quand Oi = 45 et Oc = 270 ou encore quand Oi = 340 et Oc = 180. On doit alors faire appel à d'autres éléments de connaissances tels que la "symétrie" de l'écart, l'équivalence entre 0 et 360 degrés, et introduire quelques modifications dans la façon de mesurer l'écart pour évaluer l'orientation finale:

- si l'orientation initiale est à 0 degré et que l'on se contente de diviser par deux l'orientation du coup pour trouver l'orientation finale, on constate que celle-ci va dans la direction opposée à celle que l'on a calculée (exemple : si Oi = 0 et Oc = 230, Of = 295 et non 115). Il faut donc ajouter 180 degrés à la moitié de l'orientation du coup (soit Of = (Oc/2) + 180). On peut aussi calculer l'angle formé par l'orientation du coup et par celle du mouvement initial en procédant en sens inverse des aiguilles d'une montre, soit entre Oi et Oc (exemple : 360 - 230 = 130). Pour calculer l'orientation finale, ou bissectrice de l'angle, il suffit alors de diviser cet écart par deux (exemple : si Oi = 0 et Oc = 230, l'écart entre Oi et Oc est de 130, et la moitié de cet écart est de 65) et de l'ajouter, non pas à l'orientation initiale, mais à celle du coup (soit, Of = 230 + 65 = 295) (Figure 7a). Toutefois, cette procédure est sans doute moins "économique".

- si l'orientation initiale est différente de 0 degré, mais située entre 0 et 180 degrés (par exemple : Oi = 45), on peut évaluer l'orientation finale à partir de la "moyenne" de l'orientation du coup et de celle du mouvement initial, à condition d'y ajouter 180 degrés, soit ((Oc + Oi)/2) + 180). On peut aussi trouver l'orientation finale en calculant la moitié de l'écart, c'est-à-dire la bissectrice de l'angle. Pour mesurer correctement l'angle formé par Oc et Oi, on doit cependant procéder en sens inverse des aiguilles d'une montre. On ajoute ensuite la moitié de cet écart à l'orientation du coup et non pas à celle du mouvement initial. Il importe alors de saisir l'équivalence entre 0 et 360 degrés pour pouvoir évaluer correctement l'écart. Par exemple, si l'on donne un coup à 270 degrés sur un mouvement initial à 45 degrés, l'écart entre 270 et 360 ou 0 degré(s) est de 90 degrés, l'écart entre 360 ou 0 degré(s) et 45 degrés est de 45. L'écart total entre 270 et 45 degrés est donc de 135 (Figure 7b). L'orientation finale correspond alors à 270 + (135/2), soit 337.5. Il en est de même, pour ce qui est de la mesure de la bissectrice de l'angle formé par Oi et Oc lorsque Oi est situé entre 180 et 360 et Oc est situé entre 0 et 180 (par exemple: Oi = 340 et Oc = 180).

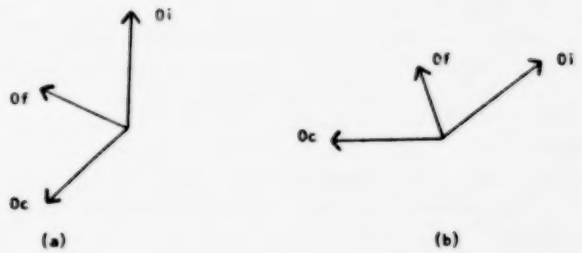


Figure 7

La différenciation et la mise en relation de ces divers "cas" peut amener à découvrir qu'il est impossible de modifier l'orientation initiale de 90 degrés ou plus, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale. Prenons le cas simple où l'orientation initiale est à 0 degré. Si l'on donne un coup de même grandeur que la vitesse initiale, on ne pourra jamais obtenir d'orientation finale au-delà de 90 degrés ou de 270 degrés, quelle que soit l'orientation du coup.

En effet, on sait que l'orientation finale se situe toujours au milieu de l'écart ou de l'angle formé par l'orientation initiale et par celle du coup, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale.

- si l'on donne un coup à 90 degrés, l'orientation finale sera de 45 degrés.
- si l'orientation du coup est comprise entre 0 et 90 degrés, l'orientation finale va se situer entre 0 et 45 degrés.
- si l'orientation du coup est comprise entre 90 et 180 degrés, l'orientation finale va se situer entre 45 et 90 degrés.

Lorsque l'on donne un coup dont l'orientation est de 180 degrés (Oi étant de 0), le coup a pour effet d'arrêter le mouvement de la balle puisqu'il est de même grandeur que la vitesse initiale et de direction opposée. Dans ce cas, la balle ne pourra donc pas aller au milieu de Oi et de Oc, c'est-à-dire à 90 degrés. C'est la même chose si l'on donne des coups d'une quelconque orientation comprise entre 180 et 270 degrés. L'orientation finale va nécessairement se situer entre 270 et 0 (ou 360) degré(s). De sorte que l'on ne pourra jamais obtenir d'orientation finale entre 90 et 270 degrés, mais seulement dans le demi-plan de 180 degrés constitué par les 90 degrés de part et d'autre du mouvement initial (Figure 8).

Ainsi, quelle que soit l'orientation initiale du mouvement, le fait de donner un coup qui a la même grandeur que la vitesse initiale limite le nombre d'orientations dans lesquelles on peut envoyer la balle. La Figure 8 représente les différentes orientations dans lesquelles on peut envoyer la balle, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, l'orientation initiale étant à 0 degré.

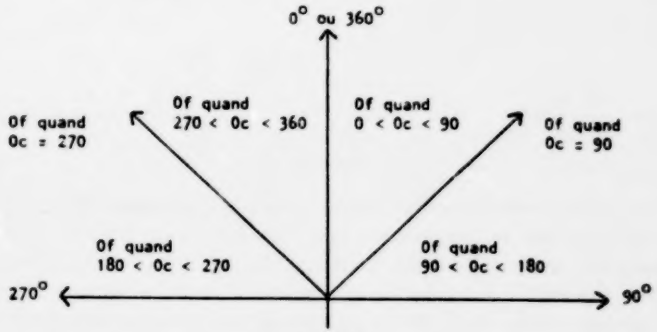


Figure 8

b) Cas où Gc est différente de Vi

Quand la grandeur du coup est différente de la vitesse initiale, l'orientation finale se rapproche de celui des deux qui a la plus grande valeur et elle s'en rapproche d'autant plus que l'écart est important entre la grandeur du coup et la vitesse initiale. On peut évaluer approximativement, à partir de la moyenne ou du milieu de l'écart, où va se situer l'orientation finale selon que la grandeur du coup est inférieure ou supérieure à la vitesse initiale :

- si la grandeur du coup est inférieure à la vitesse initiale, l'orientation finale se rapproche davantage de l'orientation initiale que de celle du coup. On peut donc la situer entre l'orientation initiale et la moitié de l'écart formé par l'orientation initiale (Oi) et par celle du coup (Oc) (Figure 9a);
- inversement, si la grandeur du coup est supérieure à la vitesse initiale, l'orientation finale se rapproche davantage de l'orientation du coup que de celle du mouvement initial. Elle va donc dépasser la moitié de l'écart entre l'orientation initiale (Oi) et celle du coup (Oc) et se situer entre le milieu de l'écart et l'orientation du coup (Figure 9b).

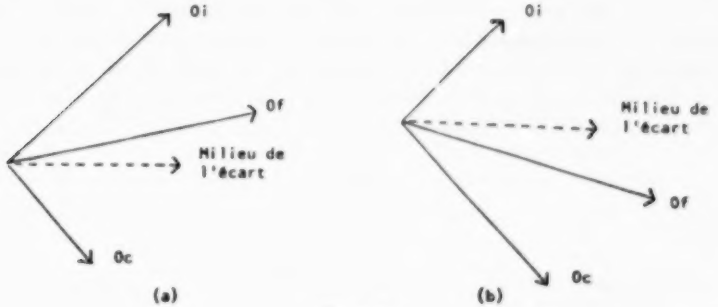


Figure 9

Ces mêmes relations se retrouvent, dans le système des flèches, lorsque le nombre de coups donnés dans deux orientations symétriques est différent : l'orientation du mouvement se rapproche alors davantage de celle des deux orientations dans laquelle on a donné le plus grand nombre de coups. La figure suivante (Figure 10) illustre comment on peut situer l'orientation finale selon que l'on donne le même nombre ou un nombre différent de coups horizontaux et verticaux (système des flèches).

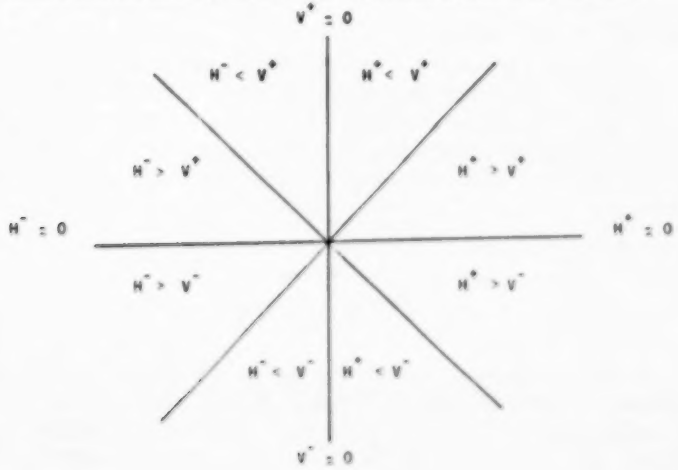


Figure 10

L'orientation finale est donc liée à une certaine proportionnalité qualitative ou logique entre la grandeur du coup et la vitesse initiale. Celle-ci est particulièrement simple à découvrir dans le système des flèches. En effet, pour modifier la vitesse de la balle sans changer son orientation, il suffit de conserver le rapport entre le nombre decoups horizontaux et verticaux. Par exemple, 4 coups à 0 degré et 8 coups à 90 degrés vont produire un mouvement de même orientation que 2 coups à 0 degré et 4 coups à 90 degrés. Cependant, si l'on essaie de quantifier l'orientation finale de façon plus précise dans le système des coups, la grandeur du coup étant, par exemple, deux ou trois fois plus grande que la vitesse initiale, on constate qu'il ne s'agit pas d'une proportionnalité simple, c'est-à-dire que l'orientation finale ne sera pas simplement deux ou trois fois plus proche de celle du coup que de celle du mouvement initial.

L'orientation du coup (Oc) et celle du mouvement initial (Oi) constituent en quelque sorte des "limites" dont on peut seulement se rapprocher, mais que l'on ne peut pas vraiment atteindre. Ainsi, par exemple, quand on donne plusieurs coups dans une même orientation, mais différente de celle du mouvement initial, on remarque que le changement d'orientation est de moins en moins grand au fur et à mesure que l'on donne des coups. Ceci est dû au fait que plus on donne de coups, plus la vitesse augmente et devient importante par rapport à la grandeur du coup. Celui-ci a donc de moins en moins d'effet sur le changement d'orientation si bien que la balle conserve, à chaque coup, davantage de sa propre orientation même si elle se trouve quelque peu modifiée par celle du coup. De même, quand la grandeur du coup est nettement supérieure à la vitesse initiale, on constate que l'orientation finale ne fait que se rapprocher de celle du coup sans toutefois jamais l'atteindre. Ainsi, dans ces situations, il est nettement plus difficile d'évaluer l'orientation finale avec exactitude puisque l'on ne peut utiliser un schème de proportionnalité simple mais qu'il faut avoir recours à des algorithmes de calcul plus complexes.

Schème de l'écart

Le schème de l'écart correspond à une description des changements de vitesse dans les situations bidimensionnelles, c'est-à-dire lorsque le coup est donné dans une orientation différente de (mais non opposée à) celle du mouvement initial. Il consiste à se représenter l'effet du coup sur le changement de vitesse de la balle non seulement en rapport avec la grandeur du coup, mais en termes d'écart plus ou moins grand entre l'orientation initiale de la balle et celle dans laquelle on donne le coup. Pour un coup d'une quelconque grandeur, l'augmentation maximum de vitesse a lieu lorsque le coup

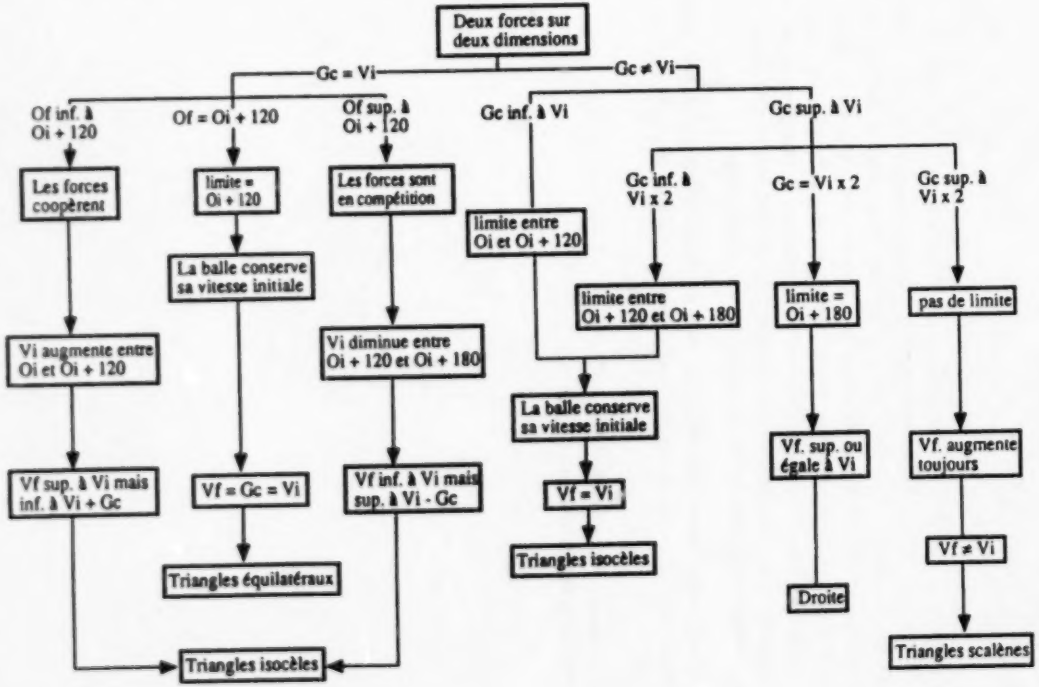
est donné dans la même orientation que le mouvement initial et l'augmentation minimum ou diminution maximum de vitesse a lieu lorsque le coup est donné dans l'orientation opposée à celle du mouvement initial (situations unidimensionnelles). Entre les deux, c'est-à-dire lorsque l'orientation du coup diffère de celle du mouvement initial (situations bidimensionnelles), la vitesse peut soit augmenter, soit diminuer, ou encore demeurer la même. Mais ces changements de vitesse, augmentation ou diminution, sont toujours inférieurs à la grandeur du coup. Ainsi, plus l'orientation du coup se rapproche de celle du mouvement initial, plus l'action du coup tend à faire augmenter la vitesse. Inversement, plus l'orientation du coup se rapproche de l'orientation opposée à celle du mouvement, moins son action tend à faire augmenter la vitesse.

Ce schème inclut des éléments de connaissance qui font également partie du schème unidimensionnel, par exemple, le fait de savoir comment la vitesse change lorsque le coup est donné dans la même orientation que le mouvement ou en direction opposée. Il intègre également plusieurs autres éléments de connaissances, tels que les notions d'écart, de symétrie, de champ, de limite, etc. dont certains font aussi partie du schème de la moyenne (notions d'écart et de limite).

La notion de limite est ici liée à la conservation de la vitesse initiale. Celle-ci représente l'invariant du système de transformations constitué par les changements de vitesse. En effet, dans les cas où, pour une même grandeur de coup, la vitesse parfois augmente et parfois diminue selon l'orientation du coup, il existe une limite à partir de laquelle la vitesse cesse d'augmenter pour ensuite commencer à diminuer. Cette limite correspond à la situation dans laquelle l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup est telle que le coup a pour effet de conserver la vitesse initiale de la balle en ne modifiant que son orientation. L'identification de la limite joue un rôle important dans l'anticipation des changements de vitesse puisqu'elle permet de délimiter le "champ" des orientations (écart entre 2 orientations) qui, pour un coup d'une certaine grandeur, vont faire augmenter la vitesse, et le "champ" des orientations qui vont faire diminuer la vitesse. Ce schème permet d'effectuer des approximations qualitatives de la vitesse finale et de différencier les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale de ceux où elle est différente.

Le tableau 3 (page suivante) présente les principales relations qualitatives en jeu dans le schème.

Tableau 3: Principales relations qualitatives en jeu dans le schème de l'écart



a) Cas où Gc est égale à Vi

Le cas le plus "simple" est celui dans lequel la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale. On peut reconstituer avec exactitude la limite qui conserve au mouvement sa vitesse initiale puisqu'elle se situe toujours exactement à 120 degrés de l'orientation initiale (soit Oi + 120). En effet, lorsque l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup est de 120 degrés, la vitesse se conserve, c'est-à-dire que la vitesse finale est égale à la fois à la vitesse initiale et à la grandeur du coup (Vf = Vi = Gc) (Figure 11a). Ceci permet d'effectuer certaines anticipations qualitatives des changements de vitesse, lorsque l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup n'est plus de 120 degrés, même si l'on ne peut prévoir exactement de combien la vitesse va changer.

- si l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup est inférieur à 120 degrés, la vitesse augmente. La vitesse finale sera donc supérieure à la vitesse initiale (Figure 11 b);
- si cet écart est supérieur à 120 degrés, la vitesse diminue. La vitesse finale sera donc inférieure à la vitesse initiale (Figure 11c).

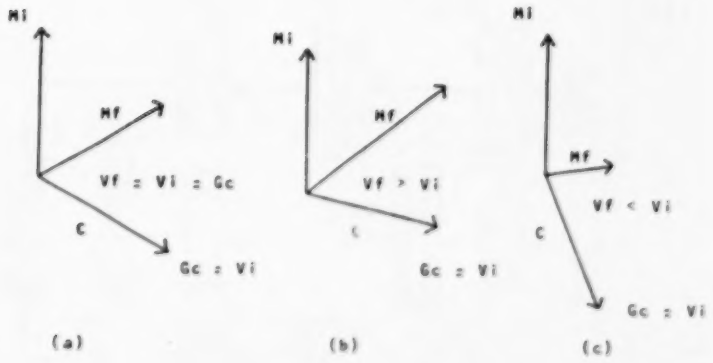


Figure 11

b) Cas où Gc est différente de Vi

Lrsque la grandeur du coup est différente de la vitesse initiale, l'écart qui conserve au mouvement sa vitesse initiale n'est plus de 120 degrés puisqu'il dépend également de la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale. Toutefois, on sait que le changementde vitesse (augmentation ou diminution) est d'autant plus important que le coup est grand. On peut donc supposer qu'il faudra un plus grand écart pour que la vitesse se conserve. Inversement, moins le coup est grand, moins la vitesse augmente. Il faudra donc unmoins grand écart pour que la vitesse se conserve. Ainsi, on peut parfois obtenir un même changement de vitesse en compensant un moins grand coup par un écart plus faible entre l'orientation initiale et celle du coup et réciproquement (Figure 12).

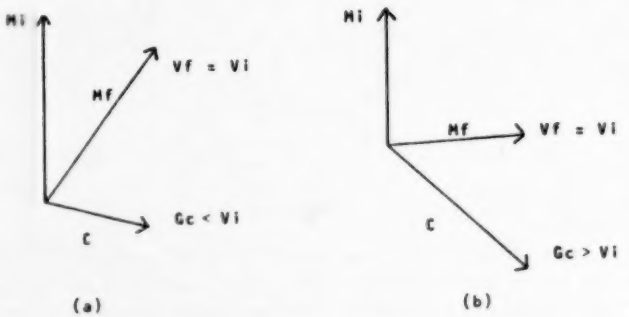


Figure 12

Mais comme il ne s'agit pas d'une proportionnalité simple, il est difficile d'évaluer avec précision quelle est la limite, c'est-à-dire quelle orientation donner au coup, par rapport à l'orientation initiale de la balle, pour que celle-ci conserve sa vitesse. On peut cependant faire certaines inférences à partir, d'une part de ce que l'on sait à propos de la conservation de la vitesse initiale, dans les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse et d'autre part, de ce que l'on sait à propos du rôle de la grandeur du coup sur le chngement de vitesse :

- si la grandeur du coup est supérieure à la vitesse initiale, l'écart qui conserve au mouvement sa vitesse initiale devrait être supérieur à 120 degrés (Figure 13a);
- si la grandeur du coup est inférieure à la vitesse initiale, cet écart devrait être inférieur à 120 degrés (Figure13b).

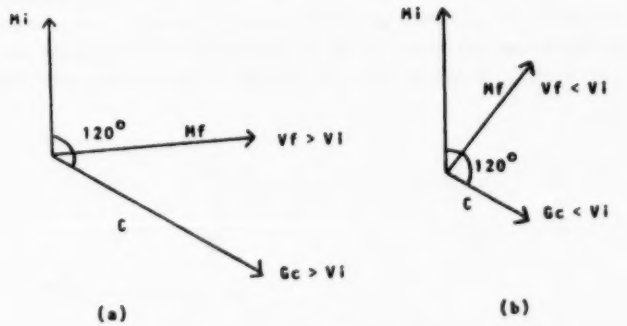


Figure 13

Par ailleurs, lorsque la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale, certaines observations peuvent faciliter l'approximation qualitative des changements de vitesse. On peut en effet constater que l'écart est symétrique, c'est-à-dire que pour une même grandeur de coup, un même écart de part et d'autre de l'orientation initiale va produire le même changement de vitesse. Par exemple, si l'on a un mouvement initial à 0 degré et que l'on donne un coup de même grandeur que la vitesse initiale, la vitesse se conserve avec un coup à 120 degrés, mais aussi avec un coup à 240 degrés. Par ailleurs, quand la grandeur du coup est deux fois plus grande que la vitesse initiale, on sait que l'écart qui conserve au mouvement sa vitesse initiale est de 180 degrés. Ceci correspond à la situation unidimensionnelle où l'on donne un coup deux fois plus grand que la vitesse initiale, en direction opposée à celle du mouvement. Or 180 degrés constitue l'écart maximum entre deux orientations. Ces observations permettent de faire certaines inférences :

- si la grandeur du coup est supérieure au double de la vitesse initiale, la vitesse augmente toujours quelle que soit l'orientation du coup;

- si la grandeur du coup est supérieure à la vitesse initiale, mais inférieure au double de la vitesse initiale, l'écart qui conserve au mouvement sa vitesse initiale est supérieur à 120 degrés mais inférieur à 180 degrés.

Cette représentation permet d'identifier, avec précision dans certains cas et approximativement dans d'autres cas, le "champ" des orientations de coups qui font augmenter la vitesse et le "champ" des orientations qui la font diminuer, en fonction justement de cette limite. Dans le cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, le 120 degrés d'écart permet de diviser l'ensemble des orientations possibles en trois "tranches" de 120 degrés. Les deux tranches situées de part et d'autre du mouvement initial correspondent au "champ" des orientations qui font augmenter la vitesse et la troisième tranche correspond au "champ" des orientations qui font diminuer la vitesse (Figure 14a). L'orientation opposée au mouvement initial divise cette tranche en deux parties égales et symétriques. Cette tranche tend à se rétrécir lorsqu'on augmente la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale et elle tend au contraire à s'élargir lorsqu'on diminue la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale (Figures 14b et 14c).

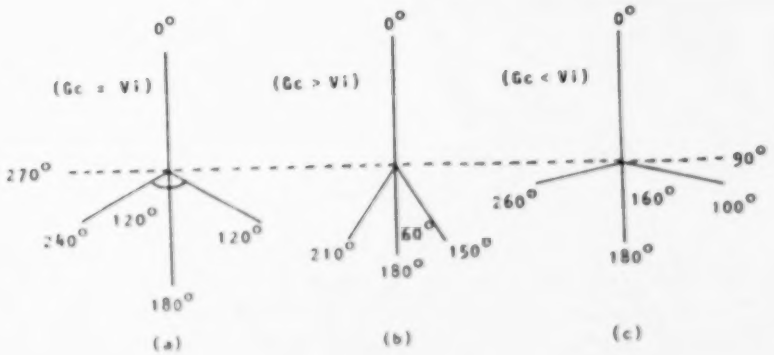


Figure 14

Schème d'addition graphique des vecteurs

Le schème d'addition graphique des vecteurs correspond à une certaine formalisation des relations qualitatives que les autres schèmes permettent d'établir. Il consiste à relier les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial à des vecteurs et à représenter ces derniers par des flèches possédant une longueur et une direction. La grandeur du coup et la vitesse du mouvement sont associées à la longueur des vecteurs. L'orientation du coup et celle du mouvement sont associées à la direction des vecteurs.

L'addition graphique des vecteurs consiste à mettre bout à bout les vecteurs représentant mouvement initial et coup et à trouver la résultante. La vitesse et l'orientation finales correspondent alors à la longueur et à la direction du vecteur résultant. Ce schème constitue une autre façon de décrire ou de représenter les changements de vitesse et d'orientation de la balle. Il permet d'avoir une assez bonne idée du mouvement final en dessinant approximativement les vecteurs. On peut mesurer les caractéristiques du mouvement final avec davantage de précision, à partir des valeurs associées au mouvement initial et au coup, en reproduisant les vecteurs à l'échelle. Cette représentation peut s'avérer particulièrement utile lorsque l'on a à la fois une grandeur de coup différente de la vitesse initiale et une orientation de coup différente de l'orientation initiale. Si l'on met bout à bout des vecteurs d'une certaine longueur et d'une même direction, la vitesse finale correspond à la somme des vecteurs mis bout à bout ou longueur du vecteur résultant (Figure 15).

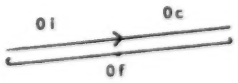


Figure 15

Si l'on combine des vecteurs de directions différentes, l'addition vectorielle se traduit géométriquement par un triangle. Le mouvement final correspond à la résultante des deux premiers vecteurs et l'on trouve cette résultante en fermant le triangle. On peut illustrer les changements de vitesse et d'orientation, en fonction du coup, à l'aide de flèches représentant le mouvement initial (Mi), le coup (C) et le mouvement final (Mf) (Figure 16)

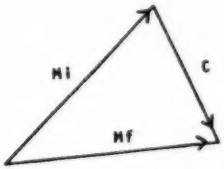
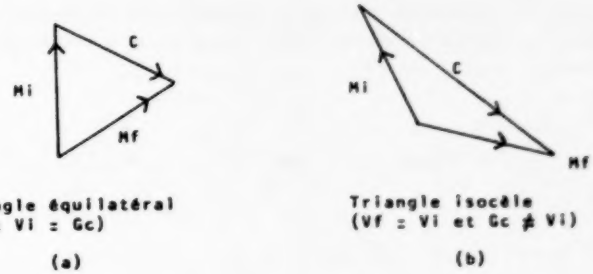


Figure 16

Lorsque l'on fait appel au schème d'addition graphique des vecteurs (ou paralléllogramme des vecteurs) et à des éléments de connaissances en géométrie, on peut expliquer pourquoi l'écart qui conserve au mouvement sa vitesse initiale (soit Vf égale à Vi) est de 120 degrés lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale et pourquoi il est inférieur ou supérieur à 120 degrés selon que la grandeur du coup est inférieure ou supérieure à la vitesse initiale. En effet, si l'on représente graphiquement, à l'aide de flèches, les relations entre coup, mouvement initial et mouvement final, dans les cas où la vitesse finale est égale à la vitesse initiale, on obtient, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, un triangle équilatéral (soit Vf = Vi = Gc), et lorsque la grandeur du coup est différente de la vitesse initiale, un triangle isocèle (soit Vf = Vi mais différente de Gc). Le premier correspond à un triangle dont les trois côtés, représentant mouvement initial, coup et mouvement final, sont égaux (Figure 17a). Les trois côtés étant égaux les angles extérieurs, qui correspondent à l'écart entre ces orientations, sont les mêmes : ils sont de 120 degrés chacun, soit 360/3. Le second correspond à un triangle dont les deux côtés opposés, représentant mouvement initial et mouvement final, sont égaux, la longueur du vecteur coup étant différente de celle des précédents (Figure 17b).



Triangle équilatéral
(Vf = Vi = Gc)

(a)

Triangle isocèle
(Vf = Vi et Gc ≠ Vi)

(b)

Figure 17

Le schème d'addition graphique des vecteurs constitue une autre façon de représenter le changement de vitesse de la balle en rapport avec l'orientation du coup. Il aide à comprendre le lien entre les caractéristiques de grandeur (ou de vitesse) et d'orientation en permettant de visualiser ce lien sous la forme d'une droite orientée. Les relations possibles entre la longueur des vecteurs (coup, mouvement initial et mouvement final) et leurs directions respectives correspondent aux différents triangles (équilatéraux, isocèles, rectangles, scalènes) que l'on peut construire avec des droites de longueurs et de directions variées.

Schème de composition vectorielle

On peut concevoir un autre niveau de connaissance correspondant à la façon dont les divers schèmes précédemment identifiés s'organisent les uns par rapport aux autres. Le schème de composition vectorielle correspond en quelque sorte à l'unification, au sein d'une représentation vectorielle, de l'ensemble des représentations construites en rapport avec les différentes situations. Il intègre, sous une forme hiérarchisée, les schèmes précédents et a essentiellement pour fonction d'en administrer l'utilisation. Il inclut des procédés qui gèrent l'évocation et l'utilisation appropriées des autres schèmes. Ceux-ci servent à identifier les représentations ou stratégies les mieux adaptées à l'évaluation des changements de vitesse et d'orientation en fonction des situations. En effet, certaines représentations peuvent s'avérer plus "économiques" ou

plus utiles que d'autres selon les situations. Par exemple, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, il n'est pas nécessaire d'avoir recours au schème d'addition graphique des vecteurs pour évaluer l'orientation finale avec précision. Il suffit d'utiliser le schème de la moyenne. Mais ce n'est plus le cas lorsque la grandeur du coup est différente de la vitesse initiale. Il est donc important de savoir reconnaître quelle est la complexité relative des situations auxquelles on se trouve confronté et quelles sont les conditions d'application d'un schème.

L'utilité du schème de composition vectorielle réside précisément dans sa capacité de faire le lien entre différentes représentations et de sélectionner, parmi l'ensemble des autres schèmes, les mieux adaptés à la situation et aux objectifs visés. De même qu'un schème n'est pas réductible à une simple addition d'éléments de connaissance, mais suppose leur organisation au sein d'une structure dynamique, de même, la compétence ne se réduit pas à un répertoire de schèmes, mais nécessite leur articulation. Dans la mesure où une même situation peut donner lieu à différentes représentations et où une même représentation peut s'appliquer différemment selon les situations, il doit y avoir une organisation dynamique de ces divers modes de représentation en fonction de leur plus ou moins grande généralité d'application et de leurs modes d'utilisation variés. C'est ce rôle que joue, à l'égard des autres schèmes, le schème de composition vectorielle puisqu'il permet d'établir des liens entre des représentations qui autrement demeureraient plus ou moins dissociées.

La construction du schème de composition vectorielle fait appel à certains "outils" de *connaissances logico-mathématiques* que Piaget qualifie de *schèmes formels*. En effet, la compétence n'est pas uniquement reliée aux contenus de connaissances visés, c'est-à-dire à ce qu'il y a à comprendre en rapport avec différentes situations et aux concepts (mouvement, vitesse, orientation, vecteurs, etc.) reliés à cette compréhension, mais également aux outils logico-mathématiques intervenant dans la structuration des informations et la manipulation de représentations. La composition vectorielle n'est pas une donnée observable, mais le résultat d'une construction. Le concept de vecteur repose sur l'unification des aspects d'intensité (grandeur ou vitesse) et de direction. Ces aspects constituent des facteurs hétérogènes qui, dans la mesure où ils interviennent au sein d'une même entité, ne peuvent être envisagés à l'exclusion l'un de l'autre, mais uniquement dans leur interrelations.

Ainsi, on ne peut pas comprendre correctement comment la direction du coup se combine à celle du mouvement initial si l'on ne tient pas compte de l'intensité

relative des forces (grandeur du coup et vitesse initiale). Inversement, on ne peut pas comprendre comment la grandeur du coup se combine à la vitesse initiale du mouvement si l'on ne tient pas compte de leurs directions respectives. Pour comprendre les relations entre coup et mouvement initial, il faut donc parvenir à décomposer, coordonner et quantifier, sous une forme au moins qualitative, les variables (intensité et direction) en jeu. La représentation de la résultante de deux vecteurs suppose en effet la représentation simultanée des actions qui la composent et donc des interactions entre leurs variables. D'où la nécessité d'effectuer une synthèse des facteurs d'intensité et de direction en différenciant et en coordonnant leurs effets. Or, une telle synthèse ne peut se faire sans le recours à certains outils de structuration logique (que Piaget appelle schèmes formels) permettant d'analyser les facteurs ou les variables en jeu dans leurs interrelations.

Dans ses études sur la formation psychogénétique du concept de vecteur, dans des situations statiques où des forces variant en intensité et/ou en direction se composent, Piaget (1973b) constate en effet que le concept de vecteur, sous sa forme "intuitive", n'apparaît qu'au niveau opératoire formel avec la synthèse des facteurs d'intensité et de direction. Il explique le caractère tardif de la composition des directions par la nécessité de subordonner les états à des systèmes de transformations intégrant les actions aussi bien virtuelles que réelles. La notion d'équilibre suppose une compensation des transformations virtuelles du système. En effet, lorsque les forces à composer ne sont pas symétriques, leurs actions doivent être conçues à la fois séparément, c'est-à-dire indépendamment l'une de l'autre (actions virtuelles) et en tant qu'agissant synchroniquement.

Selon Piaget, un tel "schématisme causal" ne peut s'élaborer sans le recours aux outils logico-mathématiques propres à la pensée formelle. En particulier, il fait intervenir les opérations combinatoires dont le caractère essentiel est de subordonner les données observables aux hypothèses compatibles avec ces données. Ces opérations permettent de structurer non seulement les données réelles, mais les liaisons pouvant être construites à partir de celles-ci. Elles jouent un rôle particulièrement important dans les situations où plusieurs facteurs hétérogènes interfèrent puisqu'elles rendent possibles la dissociation des facteurs solidaire du contrôle des variables. Celle-ci intervient lorsqu'un facteur ne peut être éliminé par simple négation ou exclusion parce qu'il est toujours présent, comme c'est le cas de la vitesse (ou de la grandeur) et de la direction, puisqu'un vecteur possède toujours à la fois une longueur et une direction. Elle consiste à neutraliser le facteur dans certains cas et pas dans d'autres dans le but, à la

fois, d'analyser son action et de mettre en évidence celle des autres facteurs. On peut neutraliser les facteurs qui ne peuvent être exclus par simple égalisation ou neutralisation des différences. Par exemple, pour identifier les modifications produites sur le mouvement de la balle selon que le coup est plus ou moins grand, il convient de maintenir constante la relation entre leurs directions respectives. De même, si l'on veut analyser comment les directions se composent, on doit maintenir constante la relation entre la grandeur du coup et la vitesse initiale.

La compréhension des effets du coup sur le mouvement de la balle repose donc sur la décomposition d'une action réelle en ses composantes virtuelles puisqu'il faut se représenter coup et mouvement initial à la fois séparément, c'est-à-dire comme des actions indépendanttes, et simultanément dans leurs interrelations. De plus, les changements de vitesse et de direction correspondent à deux systèmes de transformations interreliés et interdépendants qu'il faut à la fois différencier et coordonner. L'ensemble de ces actions ou opérations et les états qu'elles génèrent définissent un système de transformations aussi bien virtuelles que réelles comportant un certain nombre d'invariants, résultant de la compensation d'actions interreliées et interdépendantes. La découverte de ces invariants, constitués par la conservation de la vitesse initiale, de la direction initiale ou des deux à la fois, suppose le recours à une pensée hypothético-déductive permettant de subordonner les données observables à l'ensemble des hypothèses compatibles avec ces données.

Ce "schématisme causal" fait également appel à un schème de proportionnalité qualitative permettant d'effectuer une quantification logique des relations en jeu. Selon Piaget (1958), la proportionnalité qualitative est préalable à la découverte des proportions métriques. Or, cette proportionnalité intervient, au moins sous une forme implicite, dans la compréhension de la combinaison de l'orientation du coup avec celle du mouvement initial. Il existe donc un lien étroit entre la compréhension de la notion de vecteur et l'élaboration des outils logico-mathématiques propres à la pensée formelle. De même que ceux-ci s'avèrent nécessaires à la construction des principaux schèmes reliés à la compétence, de même, la construction progressive de ces derniers peut servir de support à la consolidation des outils logico-mathématiques propres à la pensée formelle.

En résumé

Cette représentation de la compétence, en termes de schèmes, permet d'envisager les connaissances impliquées dans la compréhension des effets du coup sur le mouvement de la balle sous une forme "décomposable" et, par conséquent, plus aisément "apprenable". D'une part, ces schèmes, dans la mesure où ils sont constitutifs d'unités significatives et cohérentes, peuvent donner lieu à des constructions successives. D'autre part, puisqu'ils font appel à un nombre relativement limité d'éléments de connaissance pouvant se retrouver à différents niveaux et dans des organisations différentes, la construction de chacun de ces schèmes devrait pouvoir s'appuyer sur celle des précédents.

Un autre aspect de cette représentation de la compétence apte à en faciliter l'acquisition et, par le fait même, la transmission, est lié au fait que ces schèmes sont basés sur ce que Papert (1980), Lawler (1985) et diSessa (1986) appellent des *"idées puissantes"*. Ces dernières présentent la caractéristique d'être simples, générales, utiles et "syntoniques", c'est-à-dire en accord avec les connaissances préalables de l'apprenant. Elles servent d'outil pour identifier des situations particulièrement simples pouvant servir de modèle ou de prototype pour comprendre des situations plus complexes. En effet, les notions d'opposé, de moyenne, d'écart, etc. sur lesquelles reposent les divers schèmes associés à la compétence visée, permettent de ramener ce qui est nouveau à ce qui est connu, d'établir un pont entre les connaissances que les sujets possèdent déjà et celles que l'on a pour but de leur faire acquérir. Elles vont faciliter l'établissement de liens entre un problème nouveau et un autre déjà résolu. Aucune de ces notions n'est totalement nouvelle pour le sujet et ne fait appel à un formalisme qui lui est étranger. Ce qui va s'avérer essentiellement nouveau, c'est la capacité de les utiliser de façons différentes en rapport avec des situations et un contexte nouveaux. Dans cette perspective, le micromonde en tant qu'outil d'apprentissage peut être considéré comme une "communauté d'idées puissantes".

3.2.2 Aspects qualitatifs et fonctionnels de la compétence visée

Posséder la compétence, dans le contexte particulier de ce micromonde, c'est comprendre, dans les différentes situations auxquelles on peut être confronté, com-

ment la force (coup) affecte le mouvement de l'objet (balle), c'est-à-dire de quelle(s) façon(s) la vitesse et l'orientation de la balle se trouvent modifiées par l'action d'un coup d'une certaine grandeur, donné dans une certaine orientation. C'est tenir compte du mouvement initial dans l'anticipation des effets du coup et être en mesure d'effectuer des approximations qualitatives de la vitesse et de l'orientation finales à partir des valeurs associées au mouvement initial et au coup. Or ces anticipations ne reposent pas sur l'application d'algorithmes, mais sur la capacité de raisonner par approximations et d'effectuer une quantification logique des relations entre coup, mouvement initial et mouvement final, à partir de la différenciation et de la mise en relation de situations variées.

Ce raisonnement qualitatif est orienté vers la recherche de cas "simples", qui sont plus facilement quantifiables, et peuvent servir de pivot à la compréhension de situations plus complexes. En effet, dans certains cas, on peut évaluer la vitesse et l'orientation finales avec précision en faisant appel à des opérations simples telles que l'addition, la soustraction, la division, mais ce n'est pas le cas pour toutes les situations. Un aspect important de la compétence consiste donc à reconnaître quelles sont les situations dans lesquelles on peut effectuer des évaluations quantitatives précises et quelles sont celles dans lesquelles les anticipations vont demeurer purement qualitatives, à moins de faire intervenir des outils de quantification plus élaborés. Le raisonnement qualitatif joue un rôle très important dans la compréhension puisqu'il conduit à délimiter et à structurer le champ des possibilités logiques. Ce faisant, il permet de donner un sens à l'introduction de procédés servant à effectuer des évaluations quantitatives plus précises.

Cette conceptualisation adéquate des effets du coup sur le mouvement de la balle suppose donc le recours implicite à l'idée de vecteur et de composition de vecteurs. Mais cela ne signifie pas que le sujet doive utiliser consciemment le formalisme des vecteurs ou qu'il doive avoir explicitement recours à cette notion de vecteur pour décrire les situations. Cela implique simplement que la façon dont il interprète et dont il utilise les divers observables, associés aux différentes situations, reflète une compréhension implicite du concept de vecteur et des opérations liées à son utilisation appropriée. Ainsi, la compétence visée ne se réfère pas à une connaissance formelle, mais à une compréhension fonctionnelle de l'idée de vecteur. Elle ne réside pas dans la capacité de décrire, dans un langage formel, les relations en jeu entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement, mais dans l'habileté à utiliser ces relations de façon appropriée pour manipuler le mouvement.

Il importe en effet de distinguer la compréhension de la simple utilisation d'algorithmes. Le langage formel ne garantit nullement la compréhension fonctionnelle d'une idée ou d'un concept. Un sujet peut apprendre à manipuler des équations vectorielles sans pour autant savoir à quel type de situations elles correspondent et quand il convient de les utiliser. Il existe en effet une différence importante entre connaître un formalisme et savoir l'appliquer à un contexte phénoménologique particulier (diSessa, 1977). Inversement, un sujet peut posséder une compréhension "fonctionnelle" d'un concept sans avoir une connaissance du langage formel. À cet égard, Greeno (1980) établit une distinction intéressante entre ce qu'il appelle la "compréhension conceptuelle explicite" et la "compréhension conceptuelle implicite". Il associe la première à un système qui possède une connaissance du langage formel et un modèle de ce langage qui lui permet de relier de façon appropriée ces deux types de compréhension. La seconde se refère plutôt à la capacité d'utiliser les connaissances qui sont décrites dans le langage formel. Elle désigne donc l'aspect procédural des connaissances représentées par ce langage. Ainsi, par exemple, lorsqu'un sujet comprend la commutativité, cela ne signifie pas qu'il connaît le langage de l'algèbre abstraite et qu'il peut l'appliquer à l'arithmétique. Cela signifie simplement que l'utilisation qu'il fait de l'arithmétique reflète les propriétés algébriques de celle-ci.

De la même façon, les relations que le sujet est amené à établir entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial peuvent très bien refléter la compréhension et l'utilisation "implicites" du concept de vecteur et de la composition des vecteurs sans que le sujet ait explicitement recours au formalisme des vecteurs et aux algorithmes de composition vectorielle permettant d'effectuer des calculs précis. Cette distinction est d'autant plus importante que l'on peut considérer cette compréhension conceptuelle implicite comme préalable à une connaissance davantage formalisée. Autrement dit, la conceptualisation logique des relations en jeu devrait précéder leur formalisation et l'établissement de relations quantitatives précises. Dans cette perspective, le formalisme des vecteurs ne devrait pas intervenir dès le début mais uniquement à titre de structuration de connaissances qui sont déjà utilisées par le sujet sous une forme implicite. Car un tel formalisme risque fort de demeurer dissocié des phénomènes qu'il représente s'il est introduit en dehors de tout contexte d'expérience avec le mouvement.

Ainsi, comprendre les modifications produites par le coup sur le mouvement de la balle c'est, d'abord et avant tout, s'en construire une représentation appropriée, celle-ci déterminant le choix des opérations à effectuer. Une part importante de la com-

pétence réside donc dans la capacité d'abstraire l'information pertinente et d'organiser cette information sous la forme d'une représentation qualitative de la situation qui en fait ressortir les caractéristiques essentielles et permet de déterminer quelles sont les opérations auxquelles on peut avoir recours et dans quel ordre il convient de les effectuer.

Les schèmes que nous avons identifiés reflètent précisément ces divers aspects d'une compréhension fonctionnelle et qualitative de la notion de vecteur et des opérations portant sur la composition des vecteurs. Ces schèmes permettent d'unifier les caractéristiques de grandeur et d'orientation au sein d'une même entité et de considérer coup et mouvement initial comme des "objets" équivalents qui peuvent se composer. On peut supposer que, pour parvenir à générer une solution correcte ou construire une représentation appropriée, le sujet compétent aura recours à l'un ou l'autre de ces divers schèmes en fonction des situations. L'évocation d'un schème particulier consistera à construire une représentation de la situation (coordinations) à partir à la fois des informations provenant de l'extérieur (*observables*) et des connaissances préalables dont on dispose pour donner un sens à ces informations (*coordinations* déjà effectuées).

TROISIÈME PARTIE

DESCRIPTION DE L'ANALYSE EMPIRIQUE DE LA TÂCHE

CHAPITRE 4

DÉFINITION ET ORGANISATION DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

L'objectif de cette recherche, tel que présenté dans notre introduction, était de clarifier l'apport de la notion de micromonde, comme outil d'intervention pédagogique, dans le contexte d'un enseignement basé sur une approche constructiviste de la connaissance et sur une conception interactive de l'apprentissage. Après avoir décrit notre micromonde de mouvement, nous avons proposé une analyse théorique de l'activité d'exploration du micromonde. Le but de cette analyse de tâche était de préciser la nature des connaissances rattachées à cette activité (schèmes) et la façon dont elles peuvent éventuellement se construire à partir des connaissances préalables de l'apprenant et de leurs interactions avec des situations variées.

La première partie du présent chapitre porte sur l'organisation de l'étude expérimentale que nous avons effectuée auprès d'étudiantes de niveau secondaire. Par la suite, nous décrivons le scénario d'intervention utilisé pour travailler l'activité avec les sujets. Le plan d'intervention proposé est basé sur l'analyse préalable de la tâche en termes d'un certain nombre de schèmes reliés à la compétence visée. Comme nous l'avons déjà souligné, l'objectif de cette étude expérimentale n'est pas de tester une méthode d'enseignement, mais d'obtenir des données permettant d'illustrer à la fois les types de connaissances acquises à travers l'activité proposée aux sujets et la façon dont ceux-ci apprennent dans le contexte d'une "exploration guidée" du micromonde.

4.1 Organisation de la recherche

4.1.1 Sujets

Pour la présente expérimentation, nous avons réuni des sujets de différents niveaux de scolarité et de divers niveaux de compétence. L'exploration du micromonde s'est faite avec cinq étudiantes de Secondaire III et cinq étudiantes de Secondaire V.

Les étudiantes de Secondaire III n'avaient aucune formation antérieure en physique. Elles n'avaient jamais entendu parler des vecteurs et les seules connaissances sur lesquelles elles pouvaient s'appuyer étaient celles du "sens commun". Il était donc tout à fait probable que leur compétence initiale corresponde à une représentation intuitive et plus ou moins bien articulée.

Les étudiantes de Secondaire V avaient toutes fait une année de physique en secondaire IV. De plus, leur programme incluait précisément la notion de vecteur et

les lois de base de la dynamique. En principe, leur compétence initiale ne devait pas être la même que celle des étudiantes de secondaire III. De plus, elles étaient susceptibles de faire appel à ces connaissances préalables dans leur exploration du micromonde.

Ces étudiantes ont été sélectionnées sur une base volontaire. On leur a proposé de participer à une activité d'exploration du mouvement avec l'ordinateur, dans le cadre d'une recherche de doctorat, ayant pour objectif d'évaluer les possibilités qu'offre l'ordinateur dans la conception d'activités d'apprentissage en physique. Les étudiantes savaient que le but de l'activité n'était pas de mesurer leur performance mais de tester l'outil, c'est-à-dire d'évaluer l'intérêt d'une activité d'exploration du mouvement utilisant les possibilités de simulation et de manipulation interactive qu'offre l'ordinateur.

4.1.2 Endroit où s'est déroulée l'expérimentation et durée de celle-ci

L'expérimentation a eu lieu au Collège Marguerite d'Youville à Ste Foy et elle a duré huit semaines. Tous les sujets ont été vus en entrevues individuelles. Le nombre de séances par sujet était de sept. Les six premières ont été réparties sur une période de trois semaines, à raison de deux séances par semaine, et la durée de chacune des séances était de 45 minutes. Une septième séance a eu lieu 5 semaines après la fin de l'activité.

Les interventions ont été faites par nous-mêmes. Les sujets n'ont pas tous été vus en même temps. L'habileté de l'expérimentateur à intervenir étant susceptible de s'améliorer au cours de l'expérimentation, nous avons évité de prendre en même temps tous les sujets d'un même niveau de scolarité. L'exploration s'est donc faite successivement avec deux groupes hérogènes de 5 sujets :

- un premier groupe, composé de trois étudiantes de secondaire V et de deux étudiantes de secondaire III, a exploré le micromonde en octobre 1986 et a été revu en décembre 1986 pour la septième séance;
- un second groupe, composé de deux étudiantes de secondaire V et de trois étudiantes de secondaire III, a exploré le micromonde en novembre 1986 et a été revu en janvier 1987 pour la séance 7.

Avant de commencer les entrevues individuelles, nous avons rencontré les étudiantes en groupe, pour leur expliquer comment nous allions procéder et répondre à

leurs interrogations au sujet de l'activité et des objectifs que nous poursuivions. Nous avons également insisté sur l'importance de ne pas interrompre en cours de route, mais de poursuivre l'exploration jusqu'à la fin. Nous leur avons toutefois laissé la possiblité de décider, après la séance deux, si elles étaient suffisamment motivées pour continuer. Une seule étudiante a abandonné et a dû être remplacée. Toutes les étudiantes qui ont participé à l'expérimentation se sont donc montrées intéressées tant par le caractère nouveau de l'activité, puisque la plupart n'avaient jamais travaillé avec l'ordinateur, que par le contenu de cette activité (exploration de phénomènes reliés au mouvement).

4.1.3 Déroulement des entrevues

L'étudiante est placée face à l'ordinateur et à l'écran. Elle dispose d'un matériel constitué de papiers, crayon, règle, rapporteur d'angles. Ce matériel est placé à sa droite à côté de l'ordinateur. L'expérimentateur se tient à la gauche de l'étudiante de façon à pouvoir observer les différentes manipulations de celle-ci et les modifications (mouvements et valeurs qui leur sont associées) produites sur l'écran. Un magnétophone, placé sur la table de travail, permet d'enregistrer tout ce qui est dit tant par l'expérimentateur que par le sujet, à chaque séance. L'imprimante, placée un peu plus loin sur une autre table, enregistre au fur et à mesure les différents coups effectués par le sujet et les modifications des données présentes sur l'écran, c'est-à-dire les valeurs associées aux caractéristiques du coup et à celles du mouvement de la balle.

4.1.4 Recueil et analyse des données

Puisque la présente recherche s'appuie sur l'analyse détaillée de protocoles individuels, il nous apparaissait important de recueillir le plus d'informations possibles sur la démarche des sujets, les types d'interactions auxquelles elle donne lieu et les résultats de ces interactions. Les données ont donc été recueillies de la façon suivante :

Tout ce qui a été dit par le sujet et par l'expérimentateur, au cours de chaque séance, a été enregistré sur magnétophone et retranscrit verbatim. Ces données

incluent donc les différentes interventions que l'expérimentateur a pu faire à chaque séance de même que toutes les observations, anticipations, explications ou interprétations du sujet.

Les manipulations du sujet, c'est-à-dire les différentes valeurs qu'il donne à la grandeur et à l'orientation du coup de même que les valeurs associées à la vitesse et à l'orientation initiales et finales du mouvement, ont été enregistrées au fur et à mesure sur l'imprimante, à chaque séance. Nous avons également gardé tout ce que les sujets ont noté sur les feuilles qui étaient à leur disposition. Ces données nous ont permis de conserver la trace de la succession des manipulations effectuées par le sujet et de leurs résultats sur le mouvement de la balle.

À partir de ces données, nous avons pu constituer un "dossier" complet de la démarche de chacun des sujets. Ces dossiers, qui contiennent le verbatim de chacune des séances auquel sont jointes les données recueillies sur l'imprimante, nous permettent de reconstituer la démarche d'exploration de chaque étudiante de la première à la septième séance. Ils représentent une masse de données qualitatives considérable (environ 700 pages de données verbatim, sans inclure les données de l'imprimante).

Nos observations ont porté sur divers aspects de la démarche d'apprentissage des sujets :

- ce que font les sujets, c'est-à-dire les actions ou stratégies auxquelles ils ont recours, les anticipations qui leur sont associées et les résultats produits;
- ce que disent les sujets, c'est-à-dire leurs observations, explications ou interprétations des résultats, en rapport avec différentes situations;
- les interventions de l'expérimentateur et la façon dont elles ont pu orienter la démarche d'exploration des sujets.

4.2 Description du scénario utilisé

Le scénario d'intervention utilisé s'inscrit dans le contexte d'une "exploration guidée". Il repose sur la possibilité de diagnostiquer les représentations initiales des sujets à partir de leurs interactions spontanées avec le micromonde. Les interventions prévues dans le scénario vont consister essentiellement à orienter et à enrichir

l'interaction avec le micromonde, de façon à ce que les sujets soient confrontés à des situations qui ne sont ni trop simples ni trop complexes par rapport à leur niveau de compétence. Elles ont pour but d'aider l'apprenant à acquérir certaines connaissances à partir de celles dont il dispose et de l'utilisation qu'il en fait dans l'exploration de problèmes ou de situations variées. Ces interventions tentent de tenir compte simultanément de la compétence initiale des sujets, de la compétence visée, c'est-à-dire des connaissances vers lesquelles on oriente sa démarche, et des étapes éventuelles impliquées dans l'acquisition progressive de cette compétence.

Notre scénario d'intervention s'articule autour de trois grandes phases d'exploration qui sont reliées aux étapes de construction des principaux schèmes associés à la compétence visée, c'est-à-dire à l'acquisition d'une compréhension qualitative et fonctionnelle de la notion de vecteurs.

La première séance a uniquement pour but d'introduire l'activité, à l'aide du système des vitesses et orientations, et d'identifier la compétence initiale des sujets, à partir de leurs interactions spontanées avec le système des coups. Les interventions qui ont lieu au cours de cette séance sont de type essentiellement "clinique". Elles n'ont pas pour but d'aider le sujet, mais plutôt de diagnostiquer ce qu'il comprend ou ne comprend pas et les types de difficultés qu'il rencontre.

L'exploration proprement dite ne débute qu'à la séance deux et elle s'achève au terme de la séance cinq. Les interventions qui ont lieu au cours des séances 2 à 5 inclusivement sont à la fois de type "clinique" et de type "didactique", puisqu'elles visent à faciliter la compréhension de certaines situations en tenant compte de la compétence du sujet et des obstacles susceptibles d'être rencontrés. Ces deux aspects sont intimement liés puisque l'état des connaissances préalables de l'apprenant détermine les perturbations ou au contraire les types d'aides que l'on peut introduire. Les interactions spontanées des sujets avec le micromonde vont donc jouer un rôle important dans le choix des interventions. Celles-ci peuvent prendre différentes formes, allant de simples suggestions à des explications un peu plus systématiques, selon le niveau de compétence du sujet et les types de difficultés rencontrées.

Les séances 6 et 7 sont elles aussi de type "clinique" puisqu'elles visent à identifier le niveau de compétence atteint au terme de l'exploration. La séance 6 a lieu quelques jours après la séance 5 et la séance 7 a lieu 5 semaines après la séance 6.

4.2.1 Première séance

Cette séance débute par la présentation du système des vitesses et orientations. On précise à l'étudiante quelles sont les clés sur lesquelles il faut appuyer et on lui demande :

- d'observer ce qui se passe lorsqu'elle appuie sur ces clés;
- de nous dire à quoi correspondent respectivement le nombre de droite et celui de gauche.

Il s'agit simplement de l'amener à reconstituer les quatre orientations clés, à savoir 0 (ou 360), 90, 180 et 270 degrés, qui constituent le système de référence (axes orthogonaux) en fonction duquel le mouvement est décrit. Par exemple, on peut demander au sujet d'anticiper quelle valeur il faut donner au nombre de gauche pour avoir un mouvement complètement horizontal, vers la droite ou vers la gauche de l'écran, et un mouvement complètement vertical, vers le haut ou vers le bas de l'écran. La durée de cette exploration ne dépasse pas une quinzaine de minutes.

On introduit, ensuite, le système des coups. On demande d'abord à l'étudiante de nous décrire ce qu'elle voit sur l'écran, puis on l'incite à se représenter le mouvement d'une balle sur laquelle on peut donner des coups plus ou moins forts, dans différentes orientations. On lui explique également quelles sont les clés sur lesquelles il faut appuyer pour attribuer des valeurs précises à la grandeur et à l'orientation du coup et pour donner le coup. Puis on lui pose la question suivante :

J'aimerais que tu essaies de m'expliquer ce qui se passe lorsque tu donnes des coups sur la balle ?

Au cours de cette séance, on laisse le sujet explorer librement, en intervenant le moins possible, de façon à identifier comment il interagit avec le système, quelles sont les connaissances évoquées en rapport avec différentes situations et quelles difficultés il rencontre. On l'incite à verbaliser sur ce qu'il fait, dans quel but il le fait et ce qu'il observe, afin de recueillir le plus d'informations possibles. Par exemple, on peut lui demander pourquoi il choisit de donner telle ou telle valeur à la grandeur et à l'orientation du coup, qu'est-ce qu'il cherche à voir.

4.2.2 Séances 2 à 5

Phase I : exploration des situations unidimensionnelles

On commence par laisser au sujet l'initiative de l'exploration de façon à voir s'il parvient ou non à établir certaines relations entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement. Si le sujet n'évoque pas, ou ne reconstitue pas spontanément, au moins quelques-unes des relations en jeu dans les situations unidimensionnelles, où le coup est donné soit dans la même orientation que le mouvement soit en direction opposée, on lui fait successivement un certain nombre de suggestions, telles que :

1) essayer d'augmenter la vitesse de la balle sans changer son orientation;

2) essayer de ralentir ou d'arrêter le mouvement de la balle;

3) essayer d'envoyer la balle en direction opposée à celle du mouvement initial ou encore de prévoir l'effet d'un coup donné dans cette direction.

Ces interventions ont pour but d'aider le sujet à établir les relations appropriées entre les caractéristiques du coup, celles du mouvement initial et celles du mouvement final, dans les situations unidimensionnelles, en centrant son attention sur certaines situations ou sur certains problèmes à résoudre en rapport avec une situation. Le degré d'intervention est fonction des difficultés qu'éprouve le sujet. Par exemple, il peut s'avérer nécessaire d'introduire la situation où la balle est immobile au départ (clé "C") si le sujet ne parvient pas à associer l'orientation du coup à celle du mouvement.

Lorsque le sujet est parvenu à reconstituer les relations en jeu dans les situations unidimensionnelles, c'est-à-dire à anticiper quelle grandeur et quelle orientation donner au coup pour augmenter ou diminuer la vitesse de la balle sans changer son orientation, pour arrêter le mouvement ou encore pour modifier son orientation de 180 degrés, on passe à la phase II.

Phase II : exploration des changements d'orientation bidimensionnels

Les changements d'orientation bidimensionnels vont être explorés dans deux systèmes :

A/ Le système des coups qui correspond au système principal et avec lequel on travaille à chaque séance sauf une;

B/ Le système des flèches qui est exploré pendant une séance au complet.

A/ Exploration avec le système des coups

L'analyse de la tâche nous a amenée à identifier certains éléments de connaissances impliqués dans la construction du schème de la moyenne. Les interventions prévues ont précisément pour but de faciliter la reconstruction progressive de ce schème, en tenant compte des éléments de connaissances spontanément évoqués par le sujet.

1) Anticipations spontanées

On propose au sujet d'explorer les changements d'orientation et on commence par lui demander d'anticiper ce qui va se passer si l'on donne un coup dans une orientation différente de celle du mouvement initial. Cette première intervention permet de voir comment le sujet se représente spontanément les changements d'orientation bidimensionnels et dans quelle mesure il différencie les situations unidimensionnelles et bidimensionnelles.

2) Suggestion d'explorer l'effet d'un coup de même grandeur que la vitesse

Si le sujet n'arrive pas à établir de relations appropriées entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial, on lui suggère d'observer ce qui se passe lorsque l'on donne un coup de même grandeur que la vitesse, dans une orientation différente de celle du mouvement. Cette intervention vise à faciliter la tâche au sujet en induisant la stratégie d'exploration qui consiste à égaliser la variable "grandeur" (ou "vitesse") de manière à neutraliser son effet. Elle permet d'attirer l'attention du sujet sur la présence d'une relation ("moyenne" ou "milieu de l'écart") entre l'orientation initiale, celle du coup et l'orientation finale. Cette relation pouvant être plus ou moins facile à abstraire selon les sujets, il y a place pour différentes suggestions. Par exemple :

- on peut partir d'un mouvement initial à 0 degré;
- on peut suggérer de donner un coup dans une orientation symétrique à celle du mouvement , etc.

3) Suggestion d'explorer l'effet de coups de grandeurs et d'orientations différentes de la vitesse et de l'orientation initiales

Lorsque le sujet parvient à anticiper correctement l'effet, sur le changement d'orientation, d'un coup de même grandeur que la vitesse, on peut, dans un premier temps, l'inciter à généraliser à d'autres situations la relation qu'il vient d'établir entre

l'orientation initiale (Oi), celle du coup (Oc) et l'orientation finale (Of). Par exemple, on lui fait anticiper la grandeur et l'orientation qu'il faut donner au coup pour obtenir une certaine orientation finale. On lui demande ensuite d'anticiper l'effet d'un coup de grandeur et d'orientation différentes de la vitesse et de l'orientation initiales. Ces interventions ont pour but de l'amener à différencier, à travers ses manipulations, l'effet du coup sur le changement d'orientation en fonction de sa grandeur en utilisant, comme point de référence, le cas où la balle va "dans le milieu" (soit, le cas où Gc = Vi).

4) Confrontation avec des situations problématiques

L'étape suivante consiste à confronter le sujet avec quelques situations pouvant s'avérer conflictuelles, dans le but d'évaluer sa compétence dans la compréhension des changements d'orientation ou encore de l'amener à découvrir des relations nouvelles, s'il y a lieu, par simple généralisation, à des situations différentes, des relations constitutives du schème de la moyenne.

Un premier type de situations susceptibles de générer des anticipations erronées est celui dans lequel on suggère au sujet d'obtenir une orientation finale à 90 degrés ou plus de l'orientation initiale, et ce avec un coup de même grandeur que la vitesse.

Un second type de situations pouvant poser des difficultés est celui dans lequel il faut prévoir l'orientation finale à partir de l'orientation initiale et de celle du coup, l'écart entre ces deux orientations étant supérieur à 180 degrés lorsqu'il est calculé à partir de l'orientation initiale, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre.

L'exploration des changements d'orientation, dans le système des coups, peut faire l'objet de plus d'une séance, selon le niveau de compétence initiale du sujet, les difficultés rencontrées et sa plus ou moins grande facilité à les surmonter.

B/ Exploration avec le système des flèches

Ce système permet de centrer l'attention du sujet sur un certain nombre de cas particuliers intéressants. En effet, parmi toutes les situations possibles à l'intérieur du système des coups, celles dans lesquelles n'interviennent que des vecteurs orthogonaux, dont la combinaison permet de générer n'importe quel mouvement, peuvent faciliter la compréhension des relations permettant de composer coup et mouvement initial. D'un point de vue formel, la composition d'une force avec un mouvement initial est équivalente à la combinaison de deux mouvements (par exemple celui d'un navire et celui du courant) ou à la combinaison de deux forces exercées simultanément sur un même objet.

Concrètement, cela signifie qu'un coup exercé sur la balle équivaut à la composition de deux mouvements ou à celle de deux coups. Le système des flèches a précisément pour but de faciliter la compréhension des relations entre coup et mouvement initial, en attirant l'attention du sujet sur la combinaison de coups orthogonaux permettant de produire des mouvements de différentes vitesses et orientations.

L'exploration des changements d'orientation, dans le système des flèches, a donc pour but d'induire une représentation de l'orientation du mouvement en termes d'une combinaison de coups (ou de mouvements) horizontaux et verticaux. Cette représentation est jugée à priori plus simple que la représentation des effets du coup sur le changement d'orientation dans le système des coups, le sujet n'ayant pas à spécifier les caractéristiques du coup. Cette exploration vise à fournir un support additionnel, à l'étudiant, dans la compréhension des changements d'orientation.

Les interventions prévues, dans l'exploration de ce système, vont consister essentiellement à demander au sujet d'essayer :

- de reconstituer les 4 orientations à mi-chemin de l'horizontale et de la verticale;
- d'anticiper approximativement l'orientation de la balle selon que l'on donne plus de coups horizontaux ou plus de coups verticaux;
- d'obtenir différentes vitesses pour une même orientation, selon que l'on donne un nombre égal ou inégal de coups horizontaux et verticaux;
- d'obtenir différentes orientations pour une même vitesse, selon que l'on combine un nombre égal ou inégal de coups horizontaux et verticaux.

Phase III : exploration des changements de vitesse bidimensionnels

Après avoir amené les sujets à découvrir les relations en jeu dans les changements d'orientation, on centre leur attention sur les changements de vitesse dans les situations bidimensionnelles.

1) Anticipations spontanées

On commence par demander au sujet sur quoi il se base pour prévoir si la vitesse va augmenter ou diminuer, lorsque l'orientation du coup n'est plus ni identique ni opposée à celle du mouvement. Pour l'inciter à raisonner en termes d'"écart", on peut lui rappeler ce qu'il sait déjà à propos des changements de vitesse unidimensionnels, en particulier lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse et que l'on donne le coup

dans la même orientation que le mouvement (la vitesse double) ou, au contraire, dans la direction opposée (la balle s'arrête).

2) Suggestion d'explorer l'effet de coups de même grandeur que la vitesse

Si le sujet semble avoir une compréhension intuitive du rôle de l'écart, mais qu'il n'a pas spontanément recours à la stratégie qui consiste à garder quelque chose de constant (en l'occurrence, la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale), on lui suggère d'essayer des coups de même grandeur que la vitesse dans différentes orientations. On peut lui demander, par exemple, à partir de quand il pense que la vitesse cesse d'augmenter pour commencer à diminuer.

Cette intervention a pour but de l'inciter à faire des hypothèses et à les tester de façon à l'amener à découvrir empiriquement la "limite" de 120 degrés permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale. Cependant, à aucun moment, on ne suggère au sujet de valeur précise d'orientation à essayer.

3) Suggestion d'explorer les situations dans lesquelles la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale

Lorsque le sujet est parvenu à découvrir la "limite" de 120 degrés qui conserve au mouvement sa vitesse initiale, lorsque l'on donne des coups de même grandeur que la vitesse, on lui demande s'il pense que cette limite est toujours de 120 degrés, quelle que soit la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale. On l'incite, une fois de plus, à faire des hypothèses et à les vérifier à travers ses manipulations de manière à découvrir une façon d'anticiper, au moins approximativement, où se situe la "limite" (i.e. orientation de coup qui a pour effet de conserver la vitesse initiale) lorsque l'on donne un coup de grandeur et d'orientation différentes de la vitesse et de l'orientation initiales.

4) Établissement d'un lien avec la représentation graphique des vecteurs

Si les sujets possèdent déjà certaines connaissances préalables à propos des vecteurs et, plus particulièrement, de leur représentation graphique, on essaie de voir dans quelle mesure ils sont capables de faire un lien entre la conservation de la vitesse initiale, aussi bien dans les cas où la grandeur du coup diffère de la vitesse que dans les cas où elle est égale, et la représentation graphique des vecteurs en jeu. À cette étape, il y a place pour des explications un peu plus systématiques.

L'établissement de ces différentes relations entre mouvement final et coup, en fonction du mouvement initial, va s'effectuer progressivement et il se peut que le sujet

n'arrive pas à reconstituer toutes ces relations, mais seulement quelques-unes d'entre elles. Les différentes phases d'exploration, que nous venons de décrire, peuvent donc s'avérer plus ou moins longues, selon le niveau de compétence du sujet, les difficultés rencontrées et l'habileté à les surmonter. Les critères, en fonction desquels les différentes interventions prévues dans le scénario ont lieu, ne sont donc pas indépendants de la démarche spontanée des sujets.

4.2.3 Séances 6 et 7

Sixième séance

Cette séance a pour but d'identifier le niveau de compétence atteint par le sujet au terme de son exploration. Au début de cette séance, on lui repose donc la question initiale, à savoir :

Peux-tu m'expliquer ce qui se passe lorsque tu donnes un coup sur la balle ?

Il va de soi que l'on ne s'attend pas nécessairement à ce que les sujets procèdent tous de façon systématique, en différenciant d'abord les situations unidimensionnelles, puis les situations bidimensionnelles et en expliquant les relations en jeu dans ces deux catégories de situations. Certaines interventions de type "diagnostique" pourront donc avoir lieu, au cours de cette séance, dans le but d'inciter le sujet à préciser ses explications, donner des exemples, vérifier sa compréhension de certains cas particuliers.

Septième séance

Cette séance consiste à répéter la séance 6, cinq semaines plus tard, afin d'évaluer dans quelle mesure la compétence acquise par le sujet au terme de son exploration (sixième séance) présente une certaine stabilité. Il se peut en effet que le sujet reste au même niveau, qu'il régresse ou, au contraire, qu'il progresse. Les interventions qui ont lieu au cours de cette séance sont donc du même type que celles de la séance 6 puisqu'elles visent à diagnostiquer ce que l'étudiante a compris, c'est-à-dire les relations qu'elle est capable d'établir dans différentes situations, de même que les difficultés qu'elle peut encore éprouver.

4.3 Description et analyse des données

La description et l'analyse des données se sont effectuées de la façon suivante :

4.3.1 Première étape

Nous avons d'abord regroupé tous les sujets de secondaire III et tous les sujets de secondaire V. Puis, dans chacun des deux groupes, les données ont été structurées à partir des différentes phases d'exploration prévues dans le scénario, ces phases étant elles-mêmes reliées aux divers éléments de connaissance impliqués dans la construction de chacun des schèmes, tels que définis dans l'analyse préalable de la tâche. Une première étape a alors consisté à retracer la démarche d'apprentissage de chaque étudiante, en identifiant:

1) quelles relations le sujet établit spontanément, à la séance 1 (exploration libre), entre les caractéristiques du coup, celles du mouvement initial et celles du mouvement final, en fonction des situations générées.

2) quelle sont les connaissances acquises et les principaux obstacles rencontrés à chacune des différentes phases d'exploration prévues dans le scénario;

3) quel est le niveau de compétence manifesté au terme de l'exploration du micro-monde, soit à la séance 6 puis à la séance 7.

Nous avons alors cherché à caractériser les principales stratégies observées, dans chacun des deux groupes, en rapport avec les situations et/ou problèmes rencontrés aux différentes phases d'exploration du scénario d'intervention, tel qu'il s'est effectivement déroulé au cours de l'expérimentation.

4.3.2 Deuxième étape

Dans un deuxième temps, nous nous sommes penchée sur l'analyse des étapes de (re)construction des schèmes et des processus interactifs et constructifs en jeu

dans l'acquisition de la compétence. En somme, il s'agissait d'illustrer, à la lumière des données recueillies, en quoi les différentes hypothèses, stratégies, observations et/ou interprétations des sujets traduisaient une compréhension qualitative croissante de la notion de vecteur et de la composition des vecteurs, et comment s'effectuait le passage d'une étape à la suivante, dans le processus d'acquisition progressive de la compétence visée.

Ces différents niveaux de description et d'analyse nous ont permis de préciser encore davantage notre analyse de la tâche, en répondant aux questions suivantes :

(1) Quel rôle jouent les connaissances préalables de l'apprenant dans l'exploration du micromonde et dans quelle mesure ont-elles pour effet de faciliter ou au contraire de faire obstacle à la compréhension de certaines situations ?

(2) Y-a-t-il une différence, tant au niveau de la démarche d'exploration qu'à celui des connaissances acquises entre les étudiantes de secondaire III et les étudiantes de secondaire V ?

(3) En quel sens la démarche des sujets reflète-t-elle un processus d'apprentissage par *rééquilibration*, c'est à dire par restructuration progressive des connaissances préalables, à partir des différenciations et mises en relations auxquelles donne lieu leur confrontation avec différentes situations à l'intérieur du micromonde ?

(4) Enfin, quel rôle jouent les interventions dans les processus de déséquilibre et de réequilibration sous-jacents à l'acquisition progressive de la compétence ?

QUATRIÈME PARTIE

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES DONNÉES

L'apprentissage a au moins deux faces. En effet, certaines parties de notre esprit apprennent par la réussite, c'est-à-dire en se souvenant des méthodes efficaces, alors que d'autres apprennent principalement lorsque nous faisons des erreurs, en se rappelant les circonstances dans lesquelles différentes méthodes ont échoué... Il apparaît donc que si l'apprentissage par la réussite tend à façonner nos pensées, l'apprentissage par l'erreur aboutit lui aussi, quoique par des voies moins directes, à l'élaboration de pensées plus productives.

Bien entendu, nous préférons généralement apprendre par la réussite plutôt que par l'échec, mais je soupçonne que l'acquisition à partir d'expériences uniquement "positives" ne nous fait qu'assez peu progresser. Et il n'y a probablement pas moyen d'éviter au moins un léger malaise lorsque nous apportons des changements importants à nos modes de pensée.

(Minsky, 1988, p. 172)

En raison de l'ampleur du matériel recueilli, soit le verbatim de 70 séances d'une durée de 45 minutes et les données de l'imprimante, indiquant toutes les manipulations effectuées par les dix sujets à chacune des séances, nous ne pouvons évidemment présenter nos données brutes telles quelles. Nous décrirons donc la démarche des sujets de chacun des deux groupes, secondaire III et secondaire V, en relation avec les différentes phases d'exploration prévues dans le scénario. Ce dernier étant conçu dans le but de faciliter la reconstruction, par le sujet, des principaux schèmes reliés à la compétence visée, cette description nous permettra, dans un premier temps, de voir dans quelle mesure la démarche d'apprentissage des sujets met en évidence des étapes dans la (re)construction des principaux éléments de connaissance associés à chacun des schèmes. Nous essaierons également d'identifier les principaux processus d'équilibration intervenant dans la construction progressive de ces divers schèmes, à partir des connaissances que les sujets font spontanément intervenir et de leurs interactions avec différents problèmes ou des situations variées à l'intérieur du micromonde.

Puisque les données recueillies proviennent exclusivement d'entrevues "cliniques", du même type que celles effectuées par l'école piagétienne, nos données seront présentées d'une manière similaire à celle qu'utilise Piaget, c'est-à-dire en sélectionnant, dans l'ensemble des données recueillies, des extraits de protocoles permettant d'illustrer de façon significative les types de raisonnements que font les sujets dans les différentes situations auxquelles ils sont successivement confrontés. Nous ne donnerons

pas nécessairement des extraits des protocoles de chacun de nos sujets puisque, dans certains cas, ces données risqueraient d'être redondantes.

La description et l'interprétation des données recouvrent les chapitres 5 à 9 inclusivement.

Le chapitre 5 fournit une description des conduites observées à la séance 1, où les sujets sont placés en situation d'exploration libre. Le chapitre 6 porte sur la description des conduites observées en rapport avec les situations unidimensionnelles. Nous essayons de montrer, à partir des données relatives à la démarche des sujets, comment se manifeste la (re)construction progressive du schème unidimensionnel. Le chapitre 7 est consacré à l'exploration des changements d'orientation dans les situations bidimensionnelles. Nous exposons d'abord les données relatives à l'exploration du système des coups. Nous exposons ensuite les données relatives à l'exploration du système des flèches. À partir des conduites observées lors de l'exploration du système des coups, nous cherchons à mettre en évidence les principales étapes de construction du schème de la moyenne de même que les processus intervenant dans le passage d'une stratégie à l'autre. Le chapitre 8 porte sur la description des conduites observées dans l'exploration des changements de vitesse bidimensionnels. L'observation de ces conduites nous amène à retracer les principales étapes de la construction du schème de l'écart et les processus intervenant dans le passage d'une étape à la suivante. Enfin, le chapitre 9 présente le résultat global de la démarche d'apprentissage des sujets tel qu'il apparaît au cours des séances 6 et 7 où l'on repose aux sujets la question initiale (séance 1) à savoir :

> ***Que se passe-t-il lorsqu'on donne à la balle un coup d'une certaine grandeur dans une certaine orientation ?***

CHAPITRE 5

EXPLORATION LIBRE

Ce chapitre porte sur la description et l'interprétation des conduites observées au cours de la première séance. Rappellons que cette séance débute par la présentation du système des vitesses et orientations dans lequel les composantes du mouvement (vitesse et orientation) sont manipulées indépendamment l'une de l'autre. Étant donné le niveau de nos sujets (sec. III et V), l'exploration de ce système n'offrait pas d'autre intérêt que d'introduire les concepts de vitesse et d'orientation et de présenter aux sujets le système de référence (0 degré vers le haut) en fonction duquel l'orientation est décrite. C'est pourquoi nous ne nous attarderons pas à décrire l'exploration de ce système puisqu'elle s'avère très brève (environ 10 minutes) et qu'elle ne pose aucune difficulté particulière aux sujets. Les données présentées dans ce chapitre sont donc relatives uniquement à l'exploration spontanée du système des coups.

5.1 Descriptions des conduites observées à la séance 1

Cette première séance avait essentiellement pour but d'identifier la compétence manifestée par les sujets à travers leurs interactions spontanées avec le système des coups. Les stratégies d'exploration auxquelles ils ont spontanément recours, leurs anticipations, observations ou explications, de même que les types de difficultés rencontrées au cours de cette séance nous renseignent sur la façon dont ils se représentent les effets du coup sur le mouvement de la balle, avant que l'expérimentateur n'intervienne pour centrer leur attention sur tel ou tel type de situations à explorer. Nous présenterons successivement les principales stratégies observées chez les sujets de secondaire III puis chez les sujets de secondaire V.

5.1.1 Sujets de secondaire III

Aucun sujet de secondaire III ne parvient à isoler les situations les plus simples (unidimensionnelles) et n'a spontanément recours à une stratégie de "contrôle des variables". Tous ces sujets commencent par donner à la grandeur et à l'orientation du coup des valeurs complètement différentes de celles de la vitesse et de l'orientation initiales. Ils se mettent donc d'emblée dans un contexte bidimensionnel. Ceci a pour

effet de générer les situations les plus complexes et les plus difficiles à interpréter puisqu'ils ne peuvent établir de relations directes entre la grandeur du coup et la vitesse finale d'une part, entre l'orientation du coup et l'orientation finale d'autre part. La confrontation entre anticipations et résultats engendre diverses hypothèses et des tâtonnements variés dans le but d'essayer de découvrir de quoi dépendent les changements de vitesse et les changements d'orientation.

1/ Compréhension des changements de vitesse

Tous les sujets cherchent spontanément à essayer de relier la grandeur du coup à la vitesse finale plutôt qu'au changement de vitesse et ils ne tiennent pas compte de la vitesse et de l'orientation initiales. Faute de réaliser que l'orientation du coup affecte le changement de vitesse, tout comme la grandeur du coup affecte le changement d'orientation, ils ont tendance, au cours de leurs différents essais, à faire varier simultanément les variables grandeur et orientation du coup.

Voici quelques exemples :

MAT., Sec. III, Grpe 1 (séance 1) - Constatant que les variations de vitesse ne correspondent pas à la grandeur de ses coups, elle a l'impression qu'une fois le coup donné, la balle reprend peu à peu sa vitesse initiale. - *J'ai mis un petit chiffre. Je voulais voir si la grandeur allait diminuer, si ça allait aller plus doucement. Ça n'a pas l'air de marcher...* - Tu voulais voir si ta vitesse allait diminuer ? - *Oui* - Après s'être interrogée sur les changements d'orientation, elle se centre de nouveau sur les changements de vitesse et essaie un coup de grandeur 0. - *Pourquoi il ne donne pas de coup ? Ah, parce que je n'ai pas mis de vitesse je pense, alors ça ne peut pas faire de coup. Je mets la grandeur à 90... Plus je mets le chiffre gros, c'est comme la vitesse sur l'autre écran* (système des vitesses et orientations)... - Peux-tu m'expliquer ? - *La grandeur, ça équivaut à la vitesse de l'ancien écran. Plus tu mets ton chiffre gros, plus ça va aller vite. Mais après ça, une fois que j'ai donné le coup, la vitesse ralentit... bien, elle ne ralentit pas mais elle redevient comme elle était avant...*

MAP., Sec. III, Grpe 1 (séance 1) - *Tantôt j'ai donné un coup de grandeur 2 et c'est allé plus vite que quand j'avais donné un coup de grandeur 10. Il me semble que c'est supposé aller moins vite quand la grandeur est plus petite...* - Faisant varier à la fois la grandeur et l'orientation du coup, elle n'arrive pas à comprendre pourquoi la vitesse change de cette façon. - *Je cherche à comprendre comment ça se fait que c'est allé plus vite quand j'ai baissé la grandeur... Quand je mets la grandeur plus petite, c'est la même*

vitesse ou en tous cas elle ne baisse pas... Ça veut dire que, quelle que soit la grandeur, la vitesse ne change pas tellement.

ANA., Sec. III, Grp 2 (séance 1) - Après avoir constaté que le fait de diminuer la grandeur du coup augmente la vitesse au lieu de la ralentir, comme elle l'anticipait, elle essaie de voir si ce ne serait pas l'inverse, c'est-à-dire si un plus grand coup n'aura pas pour effet de diminuer la vitesse. Puis elle revient à son hypothèse initiale. - *Il me semble que si je donne un gros coup sur ma balle, elle va aller plus vite et, si je donne un petit coup, elle va aller moins vite. Mais je donne une grandeur de 1 et elle va très vite. Peut-être qu'elle va vite parce que ma balle allait déjà assez vite!* - Après avoir essayé un coup de grandeur 0, puis un coup de grandeur 2 et d'orientation 2, elle essaie successivement un très grand coup (Gc = 1000) puis un très petit coup (Gc = 1) - *Il me semble que si je donne un grand coup, la balle va aller plus vite et si je donne un petit coup, elle va aller moins vite - (coup de Gc = 1) - Elle n'a pas ralenti...* - Elle donne deux autres coups de Gc = 1 puis constate : *Je pense que je comprends... je vais voir si c'est bien ça... quand je donne un coup de 1, la vitesse augmente de 1. Si je donnais une grandeur de 50... ça augmente de 50. Donc la vitesse augmente tout le temps chaque fois que je donne un coup. Si je fais un coup de 0, la vitesse ne change pas.* - Pourquoi ? - *Parce que si je lui donne un coup de 0, je n'ai pas donné du tout de coup sur la balle, alors elle ne peut pas changer.*

Les principales stratégies observées sont donc les suivantes :

- diminuer la grandeur du coup pour voir si la vitesse va diminuer, mais sans tenir compte, ni de l'orientation initiale, ni de l'orientation du coup;
- donner à la grandeur et à l'orientation du coup la même valeur;
- donner un coup de grandeur nulle (soit Oc = 0) pour voir si la balle va s'arrêter.

Ces manipulations amènent les sujets à faire un certain nombre d'observations, par exemple le fait de constater qu'un coup de grandeur 0 ne produit aucun changement, que la vitesse augmente même lorsque l'on donne un petit coup ou, encore, que la vitesse augmente parfois d'une valeur à égale, ou presque, à la grandeur du coup, etc.

2/ Compréhension des changements d'orientation

Tous les sujets anticipent que l'orientation finale devrait correspondre à l'orientation du coup. Remarquant que ce n'est pas le cas ils font diverses hypothèses à partir de l'observation des résultats de leurs manipulations.

Voici quelques exemples :

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 1) - Constatant, après avoir essayé des orientations très différentes de celle du mouvement, que ça ne change pas grand chose, elle donne à son coup une grandeur de 1000 000, ce qui a pour effet de modifier l'orientation du mouvement. Elle en conclut : *La grandeur fait changer la vitesse et l'orientation, mais l'orientation (Oc) ne fait pas beaucoup changer... C'est quand j'ai une grande grandeur que ma balle change de sens, mais si la grandeur est petite, ça ne change pas beaucoup.*

CAR., Sec. III, Grpe 2 (séance 1) - *Je veux la faire aller à 90 degrés, donc j'additionne 90... Je veux voir si j'additionne 180 à l'orientation initiale, si ça va donner 180 au mouvement... Je pense qu'il doit y avoir un lien entre les deux orientations* (Oi et Of) *mais je ne sais pas lequel.*

MAT., Sec. III, Grpe 1 (séance 1) - Elle ne comprend pas qu'ayant donné un coup vers le haut, soit à zéro degré, *"la balle continue d'aller dans le même sens"*. Elle tente alors de modifier l'orientation de la balle en donnant le coup dans une orientation presque opposée à celle du mouvement, mais sans tenir compte de la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale, si bien que le coup ne fait que modifier l'orientation de quelques dixièmes de degrés. - *L'orientation est de 15. Je vais mettre l'orientation du coup à 180. Je vais voir, en donnant mon coup, si l'orientation change de 180... Elle change pas de 180, elle change de quelques centièmes... je ne comprends pas, je croyais que ça changerait beaucoup mon orientation mais ça change de quelques dixièmes.* - Elle en conclut donc : *C'est le mouvement qu'il y avait qui gagne.*

NAD., Sec. III, Grpe 1 (séance 1) - Ayant constaté que l'orientation tantôt augmente et tantôt diminue, elle essaie successivement des coups d'orientations opposées entre elles telles que 90 et 270, mais qui ne sont pas pas reliées à l'orientation initiale. Elle fait également varier leur grandeur. Ceci l'amène à faire certaines observations, à la fois sur les changements d'orientation et sur les changements de vitesse. - *Tantôt j'avais mis l'orientation à 90, l'orientation avait augmenté puis là je l'ai mise à 270,*

le contraire, puis l'orientation a diminué et la vitesse aussi a diminué. J'ai laissé la même grandeur. Tout à l'heure la vitesse avait augmenté puis là elle a diminué.

Les principales stratégies observées sont les suivantes :

- faire varier l'orientation du coup pour voir si l'orientation de la balle augmente ou diminue;
- donner une valeur importante à la grandeur du coup pour voir si l'orientation va changer;
- donner à l'orientation du coup une valeur égale à la différence qu'il y a entre l'orientation initiale et celle que l'on veut obtenir;
- donner un coup dans une orientation très différente de (mais non opposée à) celle que l'on recherche pour voir si l'orientation finale va correspondre à celle du coup;
- donner successivement deux coups d'orientations opposées l'une à l'autre (ex. : 90 et 270), mais sans rapport avec le mouvement initial, pour voir si cela va produire des résultats différents, si ce n'est opposés.

Ces stratégies donnent lieu à certaines constatations intéressantes telles que :

- quand on donne successivement deux coups, d'orientations opposées l'une à l'autre, l'un fait augmenter la vitesse et l'autre la fait diminuer;
- la grandeur du coup semble affecter, elle aussi, le changement d'orientation;
- quand on donne un coup en direction opposée à celle du mouvement, c'est le mouvement initial de la balle qui l'emporte, etc.

Ces diverses anticipations et stratégies semblent refléter l'idée selon laquelle la grandeur du coup est reliée à la vitesse finale et non au changement de vitesse et l'orientation du coup, à l'orientation finale et non au changement d'orientation. Ceci amène les étudiantes à considérer successivement et de façon indépendante les changements de vitesse et les changements d'orientation. Au cours de cette séance, leurs manipulations consistent donc en centrations successives et alternées sur les changements d'orientation ou sur les changements de vitesse. Celles-ci engendrent un certain nombre d'observations pertinentes, mais qui demeurent relativement "isolées" les unes des autres et, par conséquent, ne leur permettent pas encore de relier correctement les caractéristiques du coup à celles du mouvement initial.

Voici quelques extraits de protocoles illustrant la façon dont ces étudiantes se représentent les effets du coup sur le mouvement de la balle, au terme de cette première séance :

MAT., Sec.III, Grpe 1 (séance 1) - *Plus la grandeur est grande, ça change la vitesse mais pas de la grandeur du coup. L'orientation, ça change juste de quelques décimales. D'après moi, quelle que soit l'orientation de mon coup, l'orientation de mon mouvement va toujours revenir parce que mon coup n'aura rien donné... ça change juste de quelques dixièmes.*

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 1) - *La grandeur fait changer la vitesse et l'orientation, mais l'orientation ne fait pas beaucoup changer... c'est quand j'ai une grande grandeur que ma balle change de sens. J'ai compris que la vitesse, d'après le coup que je donnais, elle changeait. Mais je n'ai pas compris les changements des chiffres de l'orientation.*

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 1) - *Je pense que si le coup est vraiment grand, l'orientation va augmenter ou diminuer de beaucoup, tandis que si je donne un petit coup, l'orientation va augmenter ou diminuer juste un peu. Puis l'orientation du coup, ça me dit si ça augmente ou si ça diminue. La vitesse, je n'ai pas beaucoup compris.*

5.1.2 Sujets de secondaire V

Chez les étudiantes de sec. V qui, contrairement à celles de sec. III, ont une formation antérieure en physique, on observe davantage de différences individuelles, notamment en ce qui a trait à la différenciation de l'unidimensionnel et du bidimensionnel et aux éléments de connaissance évoqués en rapport avec les situations bidimensionnelles.

La démarche de l'une d'entre elles (HEL.) s'apparente beaucoup à celle des sujets de secondaire III, à cette différence près qu'elle cherche spontanément, au cours de son exploration, à essayer de diminuer la vitesse initiale, d'abord avec un coup de grandeur négative puis avec un coup d'orientation très différente de celle du mouvement initial. Mais elle ne différencie pas les situations unidimensionnelles et bidimen-

sionnelles et elle n'établit aucune relation précise entre les caractéristiques du coup, celles du mouvement initial et celles du mouvement final. Au terme de cette première séance, son interprétation des effets du coup sur le mouvement de la balle demeure assez globale :

HEL., Sec.V, Grpe 2 (séance 1) - *C'est comme des forces contraires... si tu veux changer beaucoup, tu lui donnes un grand coup et si tu veux presque pas le changer, tu lui en donnes moins... puis ça dépend aussi de l'orientation. Si on lui donne dans le même sens, elle va aller plus vite. Puis dans le sens contraire, je pense que ça diminue puis que ça change d'orientation.*

Trois autres sujets évoquent spontanément certains éléments de connaissance pertinents à propos des situations unidimensionnelles et/ou bidimensionnelles, mais sans établir de relations précises entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial pour anticiper les effets du coup ou rendre compte des résultats observés. On ne trouve pas davantage de stratégie systématique de "contrôle des variables", puisque ces étudiantes ont, elles aussi, tendance à faire varier simultanément les caractéristiques de grandeur et d'orientation du coup. On observe une succession de centrations, tantôt sur les changements de vitesse, tantôt sur les changements d'orientation.

1/ Compréhension des changements de vitesse

Tous ces sujets cherchent spontanément à essayer de diminuer la vitesse initiale avec un coup de grandeur négative et/ou de direction plus ou moins opposée à celle du mouvement initial. Mais un seul songe à essayer un coup à 180 degrés exactement du mouvement initial.

Voici quelques exemples :

MAR., Sec. V, Grpe 2 (séance 1) - Elle parvient à diminuer la vitesse initiale d'abord avec un coup de grandeur négative puis avec un coup d'orientation opposée à celle du mouvement, mais sans distinguer explicitement les situations unidimensionnelles des situations bidimensionnelles. - *Il faudrait que ce soit un coup de sens contraire... 30 degrés, c'est dans cette direction là. Si je voulais faire ralentir la balle je mettrais 30 + 180, 210. Je ne sais pas si ça ralentirait. La vitesse a diminué.* - Elle augmente alors la grandeur du coup et constate que la vitesse diminue encore davantage. Elle cherche ensuite à modifier l'orientation.

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 1) - Après quelques observations à propos des changements d'orientation bidimensionnels, elle essaie de trouver quelles valeurs donner aux caractéristiques du coup pour parvenir à diminuer la vitesse de la balle. *... je cherche comment diminuer ma vitesse avec un coup qui serait totalement à l'opposé pour que ma vitesse diminue. Donc, il faudrait un coup assez fort, mais... de direction opposée. Mais je n'ai pas de point de départ, je ne sais vraiment pas. Là l'orientation est à 84,... Il faudrait que je fasse l'opposé de 84. Je vais essayer comme grandeur 75* (Vi est de 123.96), *et comme orientation 200... L'orientation est totalement différente. Je l'évaluais à 45 ou 50 et elle indique 121... un changement d'une cinquantaine de degrés... Puis ma vitesse a diminué légèrement. Je vais réessayer... Ma vitesse a augmenté, elle est rendue à 148. L'orientation est encore plus à la verticale. En tous cas, je n'ai pas atteint mon objectif de vouloir changer l'orientation complètement à l'opposé.* - Elle se propose d'essayer de nouveau une orientation de 500 (ce qui correspond en fait à une Oc de 140, soit 500 - 360), en conservant une Gc de 75. - *Il ne semble pas vouloir prendre mon orientation de 500... En tous cas, je vais encore essayer... Ma vitesse est très forte et mon orientation est moins à la verticale qu'elle l'était. Puis j'ai seulement réussi à augmenter ma vitesse...*

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 1) - Elle tente, elle aussi, de ralentir le mouvement avec un coup de grandeur négative, mais sans relier correctement l'orientation du coup à celle du mouvement. - *Je vais mettre une grandeur négative plus grande,* (coup de Gc = -270) *tout à l'heure elle était peut-être trop petite... La vitesse a augmenté donc mon "moins" n'a aucune variation sur la vitesse, au contraire, elle a augmenté...* - Après avoir essayé un coup de Gc = 1 et de Oc = 270 (Oi est de 130.41) elle remarque que la vitesse a ralenti. - *Je vais changer l'orientation* (Oc de 310). *... c'est des vecteurs en fait... pour avoir une vitesse pas trop grande, j'imagine qu'il faut mesurer les vecteurs.* - Elle cherche alors à évaluer approximativement la longueur et l'orientation du vecteur qu'elle doit rajouter à son mouvement initial *"pour obtenir le vecteur résultant le plus petit possible"*. Mais elle a l'impression qu'il lui manque des informations. En particulier, elle se demande si c'est la "même unité", autrement dit, si les valeurs associées à la grandeur du coup et à la vitesse du mouvement correspondent à une même longueur de vecteur. Pour les additionner vectoriellement, explique-t-elle, il faudrait qu'elle trouve une correspondance.

Les principales stratégies observées sont les suivantes :

- donner un coup en direction opposée à celle du mouvement pour faire diminuer sa vitesse;
- donner un coup dans une direction très différente de (mais non opposée à) celle du mouvement;
- donner des coups de grandeurs négatives pour voir si la vitesse va diminuer;
- chercher la grandeur et l'orientation du vecteur coup permettant d'obtenir le vecteur vitesse "le plus petit possible".

2/ Compréhension des changements d'orientation

Les changements d'orientation, pas plus que les changements de vitesse, ne donnent lieu à une exploration très systématique. Toutefois, les stratégies d'exploration auxquelles ces sujets ont recours s'avèrent très différentes de celles des sujets de secondaire III.

MAR., Sec.V, Grpe 2 (séance 1) - Pour modifier l'orientation initiale, elle anticipe bien qu'elle doit donner au coup une orientation supérieure à celle qu'elle veut obtenir *parce que*, dit-elle, *"c'est supposé donner la résultante"*. Mais se centrant exclusivement sur l'orientation du coup et sur celle du mouvement, sans tenir compte de la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale, elle n'obtient, après plusieurs tâtonnements, qu'une approximation assez grossière de l'orientation qu'elle anticipait. Voici comment elle explique les relations entre coup et mouvement final au terme de cette première séance : *Soit que ça augmente la vitesse ou ça peut la diminuer, ça dépend de la direction... J'ai l'impression que ça marche un peu avec les vecteurs, comme on a vu en physique... J'aimerais savoir si, quand on a une grandeur négative, ça diminue la vitesse ou s'il faut aussi l'orientation contraire.*

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 1) - Elle prévoit tout de suite qu'en donnant un coup dans la même orientation que le mouvement, l'orientation de la balle ne changera pas. Mais plutôt que de vérifier si ses anticipations sont justes, elle préfère essayer des coups d'orientations différentes de celle du mouvement initial. Or, les situations ainsi générées s'avèrent difficiles à interpréter. Bien qu'elle semble comprendre la nécessité de tenir compte du mouvement initial dans l'anticipation des effets du coup, elle n'arrive pas, au cours de cette première séance, à identifier les relations en jeu entre mouvement initial, coup et mouvement final. - *Ça un effet sur la vitesse et sur l'orientation quand je fais une certaine orientation. Ce que je ne comprends pas, c'est que je n'ai pas de point*

de départ... Lorsque je donne une certaine orientation vers le haut, mon orientation après le coup est différente. Je ne suis pas allée voir si la limite est 360... Si je pouvais faire un coup contraire, avoir une orientation opposée, pour ralentir le mouvement...

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 1) - À la fin de cette séance, c'est en termes de composition de vecteurs qu'elle interprète les effets du coup (changements de vitesse et d'orientation) sur le mouvement de la balle. - *On donne un impulsion, une force dans une direction... Vu que la direction n'est pas la même, c'est de l'addition de vecteurs... tout dépendant de la grandeur de mon vecteur, ma vitesse va être plus ou moins grande. Mais je ne sais pas exactement la grandeur de mon vecteur...*

Ces trois étudiantes cherchent donc à tenir compte du mouvement initial dans l'anticipation des effets du coup sur le changement d'orientation. Deux d'entre elles évoquent même spontanément la notion de vecteur ou de composition de vecteurs, mais elles n'arrivent pas, au cours de cette séance, à utiliser cette représentation avec suffisamment de précision pour pouvoir anticiper ou expliquer correctement les effets du coup en relation avec le mouvement initial, dans les situations qu'elles ont elles-mêmes générées.

Une seule étudiante de secondaire V (CHA.) différencie explicitement, dès la première séance, les relations en jeu dans les situations unidimensionnelles et bidimensionnelles. Elle essaie d'emblée un coup de même grandeur que la vitesse initiale, d'abord dans la même orientation que le mouvement puis en direction opposée, ce qui lui permet d'arrêter le mouvement de la balle. Elle introduit ensuite la notion de "grandeurs vectorielles" pour expliquer l'effet d'un coup donné dans une orientation différente de celle du mouvement.

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 1) - Elle choisit un coup de même grandeur que la vitesse, dans une orientation symétrique à celle du mouvement, et anticipe correctement que l'orientation finale devrait se situer dans le milieu, soit à mi-chemin de l'orientation initiale et de celle du coup. Voici comment elle interprète les effets du coup sur le mouvement de la balle au terme de cette séance : *En fait, ça marche avec les vecteurs, l'impulsion, le coup qu'on donne. Si on le donne dans la même orientation que le mouvement, c'est sûr qu'elle va aller dans le même sens parce qu'on ne change rien. Mais si on le donne dans une autre direction, comme elle a déjà un mouvement, il va y avoir la somme des deux mouvements et comme la vitesse, c'est une quantité vectorielle, il faut ajouter nos vecteurs. C'est pour ça qu'elle ne va pas dans la même direction.*

Résumé

Les observations relatives à la démarche des sujets, au cours de la première séance, nous fournissent une première approximation du niveau de compétence initiale de l'ensemble des sujets (sec. III et sec. V) avant le début de l'exploration proprement dite.

a) Situations unidimensionnelles

Les conduites observées, chez toutes les étudiantes de secondaire III et chez une étudiante de secondaire V (HEL.), ne nous permettent pas vraiment d'évaluer la compétence de ces sujets en ce qui a trait à la compréhension des situations unidimensionnelles, puisque tous se mettent d'emblée en situations bidimensionnelles. On peut, tout au plus, constater qu'il n'y a aucune différenciation entre les situations unidimensionnelles et bidimensionnelles et que les stratégies adoptées ont davantage pour effet de complexifier la tâche des sujets que de la simplifier.

Trois étudiantes de secondaire V semblent différencier implicitement l'unidimensionnel du bidimensionnel, puisqu'elles évoquent certains éléments de connaissance appropriés en relation avec les situations unidimensionnelles. Mais aucune d'entre elles ne parvient à utiliser ces situations pour se simplifier la tâche et elles ne distinguent pas explicitement les relations en jeu dans ces deux types de situations. Leur exploration est davantage centrée sur l'effet du coup dans les situations bidimensionnelles.

Une seule étudiante de secondaire V évoque clairement les situations unidimensionnelles qu'elle distingue d'ailleurs très bien des situations bidimensionnelles. Elle génère spontanément la situation unidimensionnelle où la balle s'arrête et parvient à s'appuyer sur cette situation pour établir une première correspondance entre la grandeur du coup et la vitesse du mouvement.

b) Situations bidimensionnelles

Les conduites observées nous amènent à distinguer, empiriquement, trois niveaux permettant de définir la compétence des sujets par rapport aux situations bidimensionnelles.

Le premier niveau se caractérise par l'absence de relations appropriées entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial. Le sujet se centre sur

les caractéristiques du coup et néglige celles du mouvement initial. Ce niveau de compétence, qui s'apparente beaucoup aux représentations intuitives identifiées par White (1980) et diSessa (1979), correspond à la compétence initiale d'un seul sujet de secondaire V et de tous les sujets de secondaire III. L'explication des effets de coups, de grandeurs et d'orientations différentes de la vitesse et de l'orientation initiales, s'avère particulièrement difficile puisqu'ils ne sont pas en mesure de comprendre comment et pourquoi les caractéristiques du coup se combinent à celles du mouvement initial.

Le second niveau se caractérise par l'évocation de certains éléments de connaissance pertinents, en particulier des notions de vecteur et de résultante vectorielle, mais sans distinction explicite entre les situations unidimensionnelles et bidimensionnelles. Ces sujets semblent comprendre la nécessité de tenir compte du mouvement initial dans l'anticipation des effets du coup. Mais les stratégies d'exploration utilisées ne leur permettent pas nécessairement de vérifier l'adéquation de leur représentation. D'une part, ils ont parfois de la difficulté à associer les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial à la longueur et à la direction des vecteurs. D'autre part, coup et mouvement initial ne semblent pas toujours considérés comme des vecteurs équivalents qui peuvent se composer. Ils n'établissent donc pas de relations précises entre les caractéristiques du coup, celles du mouvement initial et celles du mouvement final. Ce niveau caractérise la compétence initiale de trois sujets de secondaire V.

Le troisième niveau correspond à la distinction explicite entre les situations unidimensionnelles, où l'orientation du coup est soit identique, soit opposée à celle du mouvement, et les situations bidimensionnelles où il faut faire *"la somme des deux mouvements"*, l'orientation du coup étant différente de (mais non opposée à) celle du mouvement initial. Le sujet est capable de prévoir correctement l'orientation finale dans certains situations simples (coup de même grandeur que la vitesse) qu'il a lui-même générées. Une seule étudiante (secondaire V) se situe à ce niveau.

Au terme de cette séance, ce qui distingue principalement les étudiantes de secondaire III des étudiantes de secondaire V, c'est le fait que ces dernières, à l'exception d'une (HEL.), évoquent spontanément certains éléments de connaissances (en particulier la notion de vecteur) qui témoignent de leur formation antérieure en physique, même si une seule d'entre elle (CHA.) parvient à les utiliser de façon vraiment appropriée pour anticiper ou expliquer les résultats du coup. La figure ci-dessous (Fig. 18) présente la répartition des sujets de secondaire III et de secondaire V, à la séance 1,

en fonction de leur niveau de compétence initiale, telle qu'il se manifeste à travers l'exploration spontanée du système des coups.

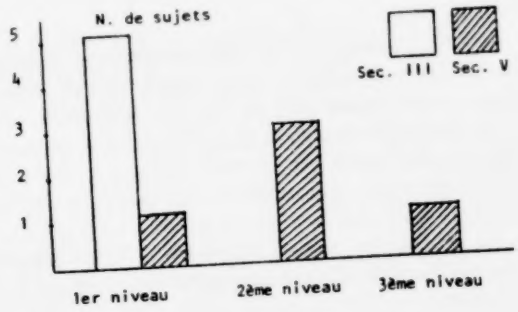


Figure 18

Niveaux de compétence initiale des sujets de Sec. III et de Sec. V à la séance 1

5.2 Analyse de la démarche d'exploration des sujets à la séance 1

On peut constater, à la lumière des données recueillies, que les premières interactions des sujets avec le micromonde ont essentiellement pour effet d'engendrer des déséquilibres dans les représentations initiales de la majorité d'entre eux. Ces déséquilibres, étant relatifs aux connaissances spontanément évoquées et utilisées par le sujet au contact de situations variées, peuvent s'avérer plus ou moins importants et prendre différentes formes.

Chez les sujets de secondaire III, les déséquilibres reflètent l'inadéquation des représentations évoquées. Ces représentations peuvent être inférées à partir des stratégies utilisées par les sujets et à partir de leur interprétation des résultats. Elles consistent à se représenter le coup comme une action indépendante de l'état de l'objet et à dissocier ses caractéristiques de grandeur et d'orientation. Elles engendrent une confusion entre situations unidimensionnelles et bidimensionnelles si bien que le sujet a

tendance à négliger plusieurs éléments d'information pertinents aux différentes situations auxquelles il se trouve confronté. Ainsi, par exemple, le fait de ne pas tenir compte du mouvement initial rend impossible une interprétation appropriée des situations bidimensionnelles dans lesquelles la grandeur et l'orientation du coup diffèrent de la vitesse et de l'orientation initiales.

Chez les sujets de secondaire V, les déséquilibres semblent plutôt liés à des difficultés d'ajustement des connaissances évoquées par rapport à un contexte différent et à des situations nouvelles. Plusieurs de ces éléments de connaissance sont pertinents, par exemple les notions de vecteurs et de composition de vecteurs, mais l'utilisation que le sujet en fait s'avère plus ou moins appropriée (sauf pour une étudiante), si bien qu'elle conduit souvent à des approximations plus ou moins correctes des anticipations liées à l'action. Cependant, si la plupart des étudiantes éprouvent quelques difficultés à relier convenablement les données observables à leurs représentations initiales, elles savent que ces dernières sont au moins partiellement adéquates, ce qui leur permet de ne pas les rejeter.

Les déséquilibres ont pour effet de déclencher ce que Piaget appelle des conduites régulatrices, c'est-à-dire des essais d'ajustement, qui consistent essentiellement à modifier les actions en fonction des résultats de leur application antérieure. Toutefois, ces actions successives ne sont pas nécessairement reliées les unes aux autres et elles prennent souvent la forme d'un tâtonnement assez peu systématique, en particulier chez les étudiantes de secondaire III. Le sujet essaie de comprendre les phénomènes observés en faisant appel à des éléments de connaissance qu'il possède et en cherchant à voir, à travers l'utilisation qu'il en fait, dans quelle mesure ces connaissances s'appliquent ou non aux phénomènes observés. Ces divers tâtonnements, qui sont en quelque sorte des tentatives effectuées par les sujets pour rétablir l'équilibre, se reflètent dans la succession des hypothèses élaborées et des stratégies utilisées. Dans la mesure où ces dernières amènent les sujets à faire un certain nombre de constatations et à établir quelques relations entre les actions effectuées et leurs résultats sur l'objet, on peut penser qu'elles suffisent déjà à introduire des modifications dans leurs représentations initiales, même s'il n'y a pas encore de rééquilibration au sens de rendre assimilable ce qui ne l'était.

Ces observations et mises en relation (par exemple, le fait de constater qu'un coup de grandeur 0 ne produit pas de changement ou, encore, que la vitesse augmente même si l'on diminue la grandeur du coup) pourraient être considérées comme

des "versions qualitatives partielles" des schèmes qui vont s'élaborer par la suite. En effet, plusieurs d'entre elles vont se retrouver ultérieurement dans l'un ou l'autre des schèmes, en relation avec d'autres éléments de connaissance. Mais, à ce niveau, elles ne suffisent pas encore à constituer les schèmes visés, faute d'être reliées les unes aux autres à l'intérieur d'un système permettant de faire, dans certains cas au moins, des anticipations correctes. Elles demeurent en effet incomplètes parce que le sujet se centre encore sur certains aspects seulement et en néglige d'autres. On peut voir ces observations et mises en relation comme autant d'éléments de connaissance issus de situations particulières. Elles s'apparentent beaucoup à ce que Lawler (1985) appelle des "microvisions disparates" et à ce que diSessa (1986) définit en termes de "primitives phénoménologiques". Il s'agit essentiellement de simples constatations ou abstractions que le sujet effectue au contact de l'expérience sans pouvoir les interpréter. Les divers éléments de connaissance, issus de ces observations et mises en relation, demeurent relativement isolés les uns des autres et leurs conditions d'application ne sont pas clairement définies, si bien que le sujet demeure plus ou moins insensible à la contradiction ou, en tout cas, incapable de la surmonter.

On peut aisément comprendre que ces premières interactions soient essentiellement "déséquilibrantes" pour les sujets. Le caractère tout à fait nouveau de la situation est en soi source de perturbation. C'est pourquoi on ne peut conclure que le sujet ne dispose pas des connaissances pertinentes du fait qu'il ne parvient pas à les évoquer ou qu'il éprouve de la difficulté à les utiliser de façon appropriée dans le contexte qui lui est proposé. C'est en effet le propre de la connaissance "intuitive" que de se présenter sous une forme "fragmentée ou morcelée" (diSessa, 1988), si bien que différents contextes peuvent susciter différentes représentations. Mais ces éléments de connaissance intuitifs ne doivent cependant pas être sous-estimés si l'on considère, avec diSessa, qu'une connaissance davantage formalisée peut s'appuyer sur une réorganisation de l'intuition plutôt que de s'y substituer. Par ailleurs, il faut considérer que les sujets se trouvent confrontés non pas à un seul problème ou à un seul type de situations, mais à une variété de situations dont la compréhension nécessite le recours à plusieurs schèmes distincts. Cette structure du problème n'est pas sans affecter le choix des connaissances évoquées pour le résoudre. Ainsi, la diversité des situations auxquelles les sujets se trouvent initialement confrontés rend particulièrement difficile l'évocation et/ou l'utilisation des connaissances pertinentes.

Comme le souligne Minsky (1986), *"le seul moyen de résoudre des problèmes difficiles consiste à les éclater en plus petits problèmes et lorsque ceux-ci sont encore trop ardus, à les diviser à leur tour. Les problèmes importants se transforment donc toujours en arbre de sous-objectifs et de sous-problèmes"*.

C'est ainsi que la rééquilibration devra s'effectuer par étapes, à travers l'évocation ou la (re)construction progressive des principaux schèmes associés à la compétence. Chacun des schèmes peut effectivement être considéré comme l'élaboration d'un raisonnement permettant d'apporter une solution à un problème précis relié à un nombre délimité de situations. L'élaboration de ces raisonnements pourra elle-même s'effectuer plus ou moins rapidement, en passant par un certain nombre de déséquilibres et de rééquilibrations. L'analyse de la démarche des sujets, aux différentes phases d'exploration, nous permettra justement de mettre en évidence les étapes de cette construction. Nous tenterons également d'identifier la nature des processus d'équilibration en jeu dans la construction successive de ces divers schèmes, c'est-à-dire la façon dont ils se construisent à partir des connaissances préalables de l'apprenant, se raffinent et s'articulent progressivement à travers leur utilisation.

CHAPITRE 6

CONSTRUCTION DU SCHÈME UNIDIMENSIONNEL

6.1 Phase I : Exploration des situations unidimensionnelles

Cette exploration débute à la séance 2. On se rappelle que le schème unidimensionnel correspond à la compréhension des changements de vitesse et d'orientation dans les situations où l'orientation du coup est soit identique, soit opposée (+ ou - 180 degrés) à celle du mouvement initial. Dans ce chapitre, nous verrons ce qui en est de ce schème, au niveau de sa construction ou de son évocation, chez les sujets de secondaire III et de secondaire V.

6.1.1 Sujets de secondaire III

À la seconde séance, aucune étudiante de secondaire III ne songe spontanément à donner un coup dans la même orientation que le mouvement initial ou en direction opposée. Ces sujets ne différencient pas davantage qu'à la première séance les situations unidimensionnelles des situations bidimensionnelles. Il s'avère donc nécessaire de travailler ces situations avec eux pour les amener à reconstituer les relations en jeu dans les changements de vitesse et d'orientation unidimensionnels.

1/ Compréhension des changements de vitesse quand Oc = Oi

a) Stratégies pour augmenter la vitesse sans changer l'orientation

Lorsqu'on suggère aux sujets d'essayer d'augmenter la vitesse de la balle sans changer son orientation, la stratégie la plus fréquente consiste à donner un grand coup, de valeur supérieure à la vitesse initiale, comme s'il y avait une certaine résistance à considérer qu'un petit coup puisse avoir pour effet d'augmenter la vitesse. Pour ce qui est de l'orientation, ces étudiantes ne pensent pas nécessairement d'emblée à lui donner une valeur identique à celle de l'orientation initiale, ce qui dénote une certaine centration sur la variable "Grandeur".

Voici d'abord quelques exemples de stratégies observées.

MAT., Sec. III, Grpe 1 (séance 2) - Serais-tu capable de donner un coup qui te permette d'augmenter la vitesse de ta balle sans changer son orientation ? - *Oui si je fais un coup de 180* (soit Gc = 180), *puis l'orientation de 88.54* (soit Oc = Oi) - Qu'est-ce

qui va se passer d'après toi ? - *La balle va continuer d'aller dans la même direction qu'elle allait parce que je lui donne mon coup dans la même direction.* - Et sa vitesse va augmenter de combien ? - *De 180...* (soit de Gc)

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - Qu'est-ce que tu pourrais faire pour augmenter la vitesse sans changer l'orientation ? - *Je mettrais la grandeur à 90, je donnerais un grand coup si je veux augmenter la vitesse... l'orientation, à 180* (soit Oc), *ça l'augmentait...* (observation qu'elle avait faite à la séance 1) - Oui, mais si tu voulais changer seulement la vitesse et pas l'orientation ? - *Je ne sais pas...* - Ta balle a quelle orientation ? - *Je la laisserais pareille, je ne sais pas...* - Elle donne son coup et constate : *Ça gardé la même orientation... Je commence à comprendre. J'ai donné 90 et elle est rendue à 110, ça fait exactement 90 de plus.*

ANA, Sec. III, Grpe 2 (Séance 2) - As-tu une idée de ce que tu pourrais faire pour augmenter la vitesse de la balle sans changer son orientation ? - *Changer la grandeur du coup peut-être...* - (Elle met la grandeur du coup à 800 sans se préoccuper de donner une valeur à l'orientation du coup) - Tu dois aussi préciser l'orientation que tu donnes à ton coup. - *Je pourrais mettre 45... parce que si je ne veux pas changer d'orientation, si je la laisse comme celle qui est déjà là, peut-être que ça ne changera pas... Ça gardé la même orientation et ça augmenté...* - De combien ? - *De 800* (soit de Gc).

MAP., Sec. III, Grpe 1 (séance 2) - Si tu voulais seulement augmenter la vitesse sans changer l'orientation, qu'est-ce que tu pourrais faire ? - *Je pense que je changerais juste le chiffre de la grandeur... je vais essayer... ça n'a pas marché. J'essaie de comprendre.* - Elle modifie de nouveau l'orientation du coup. - *J'ai remarqué que les chiffres de l'orientation baissaient et je veux voir si ça va baisser ou si ça va monter encore. Ça monté, c'est difficile à comprendre. J'essaie de voir comment ne pas changer l'orientation de mon mouvement... Quand je mets l'orientation du coup à 50* - (l'orientation du mouvement est de 29.5) - *les chiffres montent puis quand je la mets à 29, ça descend... mais j'essaie de comprendre comment ne pas changer l'orientation...*

La démarche de CAM. (Grpe 2) est tout à fait similaire à celle d'ANA. On constate qu'un seul sujet (MAT.) songe spontanément à donner le coup dans la même orientation que le mouvement en choisissant toutefois une grandeur de coup (Gc = 180) nettement supérieure à la vitesse initiale (Vi = 20). Les autres se centrent d'abord sur la grandeur du coup en négligeant plus ou moins son orientation. Mais lorsqu'on leur pré-

cise qu'il faut aussi conserver l'orientation initiale, ils découvrent assez vite qu'il ne suffit pas de donner un grand coup, mais qu'il faut aussi le donner dans la même orientation que le mouvement.

Une seule étudiante (MAP., Grpe 1) n'arrive pas à découvrir par elle-même comment augmenter la vitesse sans modifier l'orientation du mouvement. Elle essaie successivement des coups d'orientations différentes et fait aussi varier la grandeur du coup, mais sans songer à le donner dans la même orientation que le mouvement. Il s'avère alors nécessaire d'introduire la situation où la balle est immobile au départ (clé "C") pour l'amener à constater, après avoir donné successivement deux coups identiques, que la vitesse augmente d'une valeur égale à la grandeur du coup lorsque ce dernier est donné dans la même orientation que le mouvement.

2/ Compréhension des changements de vitesse et d'orientation quand $Oc = Oi + 180$

Après avoir réussi à augmenter la vitesse, plusieurs sujets songent spontanément à essayer de la diminuer ou, encore, à modifier l'orientation du mouvement en donnant un coup dans la direction qui lui est opposée. S'ils ne le font pas, on commence par leur proposer d'essayer de diminuer la vitesse de la balle.

a) Stratégies pour diminuer la vitesse sans changer l'orientation

En général, tous les sujets sauf un (MAP., Grpe 1) découvrent assez rapidement comment diminuer la vitese de la balle sans changer son orientation. L'utilisation de cette stratégie les amène alors à anticiper ou à reconnaître quelle grandeur et quelle orientation donner au coup pour arrêter le mouvement ou modifier son orientation de 180 degrés.

Voici quelques exemples :

NAD., Sec. III, Grpe 1 (séance 2) - *Disons que je voudrais diminuer sa vitesse...* - Qu'est-ce que tu pourrais faire ? - *Ce serait de mettre le contraire. C'est comme si je donnais un coup par là* (i.e. en sens inverse) *ça ferait 225 et la grandeur est à 30, je suppose que ça diminuerait de 30. Je vais essayer... c'est ça, ça gardé la même orientation et ça diminué de 30. Et si je voulais diminuer la vitesse de 90, je laisse l'orientation du coup à 225. Alors ça va me redonner comme au début. Je commence à comprendre pour garder la même orientation, augmenter ou diminuer...* - Serais-tu

capable de l'arrêter ? - *Je metttrais la grandeur à 20 et je laisserais l'orientation à 225. Elle a arrêté...*

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - *Je vais diminuer la grandeur... si je la mets à 30, je garde la même orientation, peut-être qu'elle va ralentir.* - Elle donne le coup et on lui demande ce qui s'est passé. - *C'est à peu près la même vitesse encore. Elle a augmenté mais pas de beaucoup.* - De combien ? - *De 30. Si je veux la faire diminuer...* - Elle met une Gc = 2. - *Elle n'a pas diminué, ma balle ne va pas plus lentement.* - Tu viens de donner des coups dans la même orientation que la balle. Quelle relation tu établis entre la grandeur du coup et la vitesse ? - *Quand je donne un grand coup, ça va plus vite. Mais si j'essaies de mettre un petit coup, ça ne va pas plus lentement parce que ça l'air que tous les coups que je donne s'additionnent au coup que j'avais avant... si je donne un coup de 5, c'est 5 de plus.* - Tu remarques que peu importe si tu donnes un grand ou un petit coup, quand tu le donnes dans la même orientation que le mouvement, la vitesse augmente. Qu'est-ce que tu pourrais faire pour essayer de le ralentir ? - *Peut-être en mettant le contraire. Je me dis que, si à 45 la vitesse va toujours en augmentant, peut-être que si je fais carrément le contraire* (i.e. 45 + 180), *ça va aller en diminuant...*

CAM., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - Serais-tu capable maintenant de diminuer la vitesse ? - (Elle diminue la grandeur du coup, qui était de 10, à 5) - *J'ai donné un plus petit coup et elle est allée plus vite!* - Qu'est-ce que tu en conclus ? - *Même si on donne un plus petit coup, ça va aller plus vite.* - As-tu une idée de ce que tu pourrais faire pour la ralentir ? - *Il faudrait que je change l'orientation.* - Pourquoi ? - *Parce que si je donne tout le temps dans le même sens, ça va tout le temps augmenter.* - Quelle orientation tu mettrais ? - *Je me figure un angle plat...* (Elle calcule alors 45 + 180 soit 225). - Serais-tu capable de l'arrêter ? - (Elle choisit un coup de Gc = Vi) - *Tout à l'heure, ça soustrait, alors j'ai mis la même grandeur que la vitesse.*

MAP., Sec. III, Grpe 1 (séance 2) - Après avoir donné un premier coup de grandeur 1, à 180 degrés du mouvement initial, elle constate que la vitesse a diminué et explique : *Parce que j'ai donné un faible coup en sens contraire de la balle et ça l'air que ça ralentit le mouvement.* - Et si tu avais donné un coup en peu plus fort, qu'est-ce qui se serait passé ? - *Un coup un peu plus fort... je pense que ça aurait quand même augmenté la vitesse.* - Pourquoi ? - *Parce que, même si c'est contraire à la balle, quand tu donnes un grand coup, ça va quand même augmenter la vitesse.* - Et si tu gardes une grandeur de 1 et que tu donnes encore un coup...? - *Ma vitesse va encore augmenter...*

parce que je l'ai fait ralentir, mais si je donne un autre coup, ça va augmenter quand même. - Elle constate alors, après l'avoir essayé, que la vitesse a diminué et explique : *Parce que le mouvement est déjà assez faible et si je donne un petit coup, ça va quand même ralentir. Je pense qu'à force de donner des coups de cette grandeur là, je finirais par l'arrêter... je viens de comprendre. Je lui donne toujours un coup contraire à son orientation et d'une faible grandeur, alors ça ralentit tout le temps...*

Une étudiante (NAD.) comprend tout de suite qu'il faut donner le coup en direction opposée à celle du mouvement (soit Oc = Oi + 180) si l'on veut diminuer la vitesse et elle prévoit correctement que la vitesse initiale devrait diminuer d'une valeur égale à la grandeur du coup. Les autres sujets commencent par anticiper qu'il suffit de diminuer la grandeur du coup pour faire diminuer la vitesse, sans trop se préoccuper de l'orientation. Mais, constatant que la vitesse augmente, ils évoquent alors eux-mêmes la possibilité de donner un coup en direction opposée à celle du mouvement. Par ailleurs, ils relient facilement l'**"opposé"** à l'orientation initiale plus 180 degrés. Ils savent donc que l'écart entre deux orientations opposées l'une à l'autre est de 180 degrés.

Seule une étudiante, MAP., éprouve nettement plus de difficulté que les autres à comprendre l'effet d'un coup donné en direction opposée à celle du mouvement. Même après avoir réussi à diminuer la vitesse avec un coup de grandeur un (1), elle persiste à croire qu'un second coup aura pour effet d'augmenter la vitesse, bien qu'il soit de direction opposée à celle du mouvement. Elle ne semble pas voir la relation soustractive entre grandeur du coup et vitesse initiale. Ce n'est qu'après plusieurs tâtonnements qu'elle parvient à relier correctement les caractéristiques de grandeur et d'orientation du coup, c'est-à-dire à différencier l'effet du coup selon qu'il est de grandeur inférieure, égale ou supérieure à la vitesse initiale.

b) Stratégie pour modifier l'orientation initiale de 180 degrés

Ayant réussi à augmenter la vitesse sans changer l'orientation, une étudiante (MAT.) suggère elle-même de donner un coup en direction opposée à celle du mouvement (soit Oi + 180) de façon à modifier complètement son orientation. Mais c'est seulement après l'avoir essayé qu'elle comprend la nécessité de donner un coup de grandeur supérieure à la vitesse initiale pour que l'orientation change. Ceci lui permet de découvrir comment arrêter le mouvement ou diminuer sa vitesse sans modifier son orientation.

MAT., Sec. III, Grpe 1 (séance 2) - *Je vais mettre totalement à l'opposé de l'orientation de mon mouvement. D'après moi, ça va aller complètement différent. Je dirais qu'elle va aller totalement en sens contraire...* - Elle donne son coup et constate que *ça n'a rien changé...* - Ça n'a rien changé ou si ça changé quelque chose ? - *C'est juste la vitesse qui a changé... non même pas... est-ce que la vitesse a changé... ? Je vais recommencer. Ah je comprends!... Ça diminué ma vitesse parce que l'orientation était opposée puis l'orientation est restée stable parce que, avant qu'elle change de direction, il faudrait que sa vitesse tombe à 0...*

La découverte des relations en jeu dans les situations unidimensionnelles se fait donc progressivement, à travers une exploration plus ou moins tâtonnante. Celle-ci s'avère plus laborieuse avec un sujet (MAP., Grpe 1), qui éprouve plus de difficultés que les autres à relier l'orientation du coup à celle du mouvement initial et à coordonner les aspects de grandeur et d'orientation, lorsque l'orientation du coup est opposée à celle du mouvement. Pour les autres sujets, cette exploration s'avère relativement aisée et elle n'excède pas la première moitié de la séance deux.

6.1.2 Sujets de secondaire V

La démarche d'une étudiante de secondaire V, (HEL., Grpe 2), s'apparente beaucoup à celle de l'un des sujets de secondaire III (MAT., Grpe 1) puisque les situations unidimensionnelles ne sont pas spontanément évoquées et que la reconstitution des relations en jeu dans ces situations donne lieu à quelques tâtonnements.

Lorsqu'on lui suggère d'essayer d'augmenter la vitesse sans changer l'orientation, elle anticipe tout de suite qu'en donnant un coup dans la même orientation que le mouvement, la vitesse devrait augmenter d'une valeur égale à la grandeur du coup. Mais ce n'est qu'après quelques essais qu'elle différencie clairement l'effet d'un coup donné en direction opposée à celle du mouvement selon qu'il est de même grandeur, plus grand ou plus petit que la vitesse initiale.

HEL., Sec. V, Grpe 2 (séance 2) - Après avoir réussi à augmenter la vitesse, elle se propose de modifier l'orientation de 180 degrés. - *Je pourrais laisser la grandeur et changer l'orientation, la mettre contraire en ajoutant 180 à mon 45... Elle va changer de direction mais la grandeur serait pareille... peut être pas la vitesse. Elle va revenir à*

ce qu'elle était avant. - Elle donne le coup puis constate : *Ah non, c'est vrai, la direction va rester pareille sauf qu'elle va aller moins vite. Il aurait fallu que la grandeur soit plus grande... tantôt, je n'avais pas pensé qu'il fallait que le coup soit plus grand que la vitesse pour que ça change vraiment d'orientation.*

Avec les autres étudiantes de secondaire V, il n'est pas nécessaire de travailler ces situations puisqu'elles évoquent toutes spontanément, et sans aucune intervention de notre part, les relations en jeu dans les situations unidimensionnelles, soit dès la première séance (CHA.), soit au tout début de la deuxième séance (LUC., MAR. et CAR.).

Voici quelques exemples illustrant l'évocation spontanée de ces relations :

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 1) - *Si je veux arrêter ma balle, je vais mettre la même grandeur de coup pour voir. J'ai donné la vitesse contraire à la vitesse qu'elle avait. Donc, la balle arrête, ça s'annule. Puis la direction, naturellement il n'y en a plus puisque la balle est immobile.*

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 2) - *Je vais essayer de l'arrêter. Il faudrait que je mette l'orientation à 225 et je vais essayer la grandeur à 20.* - Pourquoi tu as l'idée de mettre ta grandeur à 20 ? - *J'ai supposé que ma vitesse pouvait être égale à ma grandeur et je me suis dit que pour l'arrêter, il fallait que je fâsse un vecteur dans l'autre sens pour qu'en les additionnant ça s'annule.*

CAR., Sec. V, Grpe 1 (Séance 2) - *J'ai une vitesse de 20 et une orientation de 45. Mon orientation va rester la même si je donne un coup à 45 et que c'est initialement à 45. Je prévois que la vitesse va augmenter... c'est ça. Si j'essaie de diminuer... c'est l'orientation que je dois changer du tout au tout. Je vais mettre une grandeur à 100 et une orientation à... 225. Elle a changé complètement d'orientation et ma vitesse est à 10 parce que j'avais une vitesse de 90. Voilà, la différence on la voit 100 - 90 = 10.*

Ce qui caractérise essentiellement la démarche de ces étudiantes, par rapport à celle des autres sujets, c'est qu'elles peuvent anticiper, avant même de l'essayer, qu'un coup de même orientation que le mouvement aura pour effet d'augmenter sa vitesse, quelle que soit la grandeur du coup, et qu'il faut donner le coup à 180 degrés du mouvement initial si l'on veut diminuer sa vitesse ou modifier son orientation de 180 degrés.

Résumé

L'exploration des situations unidimensionnelles permet d'établir une première différence significative entre les sujets de secondaire III et les sujets de secondaire V. Alors que pour les premières, ces situations ne sont comprises qu'au terme d'une exploration plus ou moins tâtonnante, elles sont spontanément évoquées dès le départ par la majorité des étudiantes de secondaire V (4 sur 5). De plus, l'évocation de ces situations va de pair avec une différenciation explicite des situations unidimensionnelles et bidimensionnelles, ce qui n'est pas le cas pour les sujets de scondaire III qui ne font que commencer à comprendre certaines relations entres les caractéristiques du coup, celles du mouvement initial et celles du mouvement final.

6.2 Étapes et Processus d'équilibration en jeu dans la construction du schème unidimensionnel

La construction progressive du schème unidimensionnel se reflète dans la succession des stratégies utilisées par les sujets de secondaire III pour essayer d'augmenter puis de diminuer la vitesse de la balle sans changer son orientation. L'analyse de ces stratégies nous renseigne sur les divers éléments de connaissance que les sujets font intervenir, les obstacles qui leur sont quelquefois associés et la façon dont ils sont amenés à modifier peu à peu leurs représentations initiales. On constate que les situations unidimensionnelles s'avèrent relativement faciles à comprendre, les relations en jeu reposant sur des opérations simples d'addition et de soustraction. Ce qui fait principalement obstacle à la construction du schème, ce n'est donc pas la nature des éléments de connaissance impliqués, mais la difficulté à les évoquer et à les utiliser de façon appropriée dans un certain contexte.

Tous les sujets disposent des connaissances préalables nécessaires à la compréhension des situations unidimensionnelles. Mais encore faut-il pouvoir les identifier et les organiser en rapport avec les situations auxquelles ces éléments de connaissance s'appliquent. Tant que les sujets se trouvent confrontés aux situations bidimensionnelles, il leur est très difficile de découvrir les relations en jeu dans les situations unidimensionnelles. La diversité des situations que le micromonde permet de générer nuit à l'identification des connaissances pertinentes. Le sujet peut en effet être amené à

rejeter certains éléments de connaissance pertinents (exemple : *la vitesse augmente d'une valeur égale à Gc*), faute de pouvoir différencier les situations dans lesquelles ils s'appliquent (unidimensionnelles) de celles dans lesquelles ils n'interviennent pas (bidimensionnelles). C'est pourquoi la première séance est source de nombreux déséquilibres que les sujets ne parviennent pas à surmonter à l'aide des connaissances dont ils disposent. La rééquilibration ne pourra se faire qu'au contact de problèmes ou de situations appropriés qui vont permettre aux sujets d'établir un point de contact entre ce qui est nouveau et ce qui est déjà connu. La construction du schème unidimensionnel correspond précisément à la façon dont les divers éléments de connaissance pertinents au schème vont progressivement être sélectionnés, puis organisés, à partir des interactions du sujet avec des situations particulières à l'intérieur du micromonde.

6.2.1 Étapes de construction du schème

L'analyse de la démarche des sujets de secondaire III nous amène à distinguer essentiellement deux étapes dans la construction du schème unidimensionnel.

1ère étape : elle consiste dans la découverte de l'effet d'un coup donné dans la même orientation que le mouvement. Le sujet comprend qu'il suffit de donner un coup dans la même orientation que le mouvement, quelle que soit la grandeur du coup, pour augmenter la vitesse sans changer l'orientation initiale. L'idée centrale est que la grandeur du coup ne détermine pas la vitesse finale mais le changement de vitesse.

2ème étape : elle correspond à la découverte de l'effet d'un coup donné en direction opposée à celle du mouvement. Le sujet doit comprendre que, pour diminuer la vitesse, il faut donner le coup en direction opposée à celle du mouvement. Cela suppose la capacité de relier l'orientation opposée à celle du mouvement à l'orientation initiale + 180 degrés. Le sujet doit également parvenir à différencier l'effet du coup en fonction de sa grandeur. En effet, un coup donné en direction opposée à celle du mouvement n'a pas seulement pour effet de diminuer la vitesse sans changer l'orientation. Il peut également modifier l'orientation initiale de 180 degrés, tout en augmentant, diminuant ou conservant la vitesse initiale, en fonction de sa grandeur par rapport à la vitesse.

6.2.2 Processus de passage d'une étape à la suivante

L'analyse des processus intervenant dans la construction de ce schème nous permettra de voir comment les sujets, en étant confrontés à des problèmes relativement simples (i.e. comment augmenter ou diminuer la vitesse sans changer l'orientation), sont amenés à passer d'une représentation plutôt "aristotélicienne" de l'effet de la force sur le mouvement, à une représentation "newtonienne" faisant intervenir, au moins implicitement, le *"principe d'inertie"*.

1/ Mise en relation des observables appropriés

Au départ, les étudiantes de secondaire III ont tendance à dissocier totalement les changements de vitesse des changements d'orientation, ce qui les incite à considérer les variables deux à deux (*Vf est reliée à Gc et Of est reliée à Oc*). Leurs premières anticipations reflètent en effet l'intuition erronée selon laquelle la grandeur du coup détermine la vitesse finale et l'orientation du coup détermine l'orientation finale. On peut évidemment se demander jusqu'à quel point l'exploration initiale du système des vitesse et orientations (au début de la séance 1), quoique très brève, n'a pas eu pour effet d'induire chez ces sujets, ou tout au moins de renforcer, cette dissociation des changements de vitesse et d'orientation.

Ces représentations donnent lieu à des stratégies plus ou moins appropriées, sources de déséquilibres. Les diverses confrontations entre les anticipations liées à l'action et leurs résultats sur l'objet vont conduire à des ajustements progressifs de l'action en fonction des objectifs visés. C'est en essayant successivement d'augmenter puis de diminuer la vitesse de la balle sans changer son orientation que les sujets vont prendre conscience de l'inadéquation des représentations évoquées et chercher à les modifier. Ces modifications vont se manifester par le passage de relations directes entre la grandeur du coup et la vitesse finale à des relations faisant intervenir les autres variables. Le sujet va peu à peu évoquer et utiliser des opérations connues (addition, soustraction, écart de 180 degrés, etc.) pour les appliquer à un nouveau contexte, c'est-à-dire interpréter les "observables" (i.e. caractéristiques du coup, du mouvement initial et du mouvement final) à la lumière de ses connaissances préalables. Cette abstraction de relations nouvelles va se traduire par la construction successive de deux procédures : l'une pour augmenter la vitesse et l'autre pour diminuer la vitesse. Ces procédures vont

se coordonner, devenant ainsi deux composantes d'une seule et même procédure permettant de prévoir ou de produire des résultats (changements de vitesse et/ou d'orientation), dans certaines situations.

La première étape de cette construction consiste à découvrir l'effet d'un coup donné dans la même orientation que le mouvement, en cherchant à augmenter la vitesse sans modifier son orientation. À travers leurs manipulations, les sujets sont amenés à comprendre que, pour augmenter la vitesse sans changer l'orientation, il ne s'agit pas simplement de donner un grand coup mais de le donner dans la même orientation que le mouvement. Cette découverte, qui s'effectue très rapidement pour la majorité des sujets, conduit à l'établissement d'une première relation (soit: Vf = Vi + Gc) entre les "observables" constitués par les caractéristiques du coup et par celles du mouvement initial. Mais tous les sujets ne généralisent pas d'emblée cette relation à tous les cas où l'orientation du coup est identique à celle du mouvement, quelle que soit sa grandeur. On trouve encore, chez quelques sujets (exemples : MAP. et ANA.), une certaine résistance à considérer qu'un coup de grandeur inférieure à la vitesse initiale puisse avoir pour effet d'augmenter celle-ci, bien qu'il soit donné dans la même orientation que le mouvement. Ces sujets ne semblent pas renoncer complètement à l'intuition selon laquelle une grande vitesse implique un grand coup.

La seconde étape consiste à découvrir comment diminuer la vitesse de la balle sans changer son orientation ou à identifier l'effet d'un coup donné en direction opposée à celle du mouvement. Il arrive souvent que le sujet commence par se centrer soit sur la grandeur du coup (*pour diminuer Vi, donner un petit coup*), soit sur son orientation (*pour modifier Oi de 180 degrés, donner un coup en sens contraire du mouvement*), avant de parvenir à relier simultanément les variables grandeur et orientation. Ainsi, c'est généralement seulement après avoir constaté que le fait de diminuer la grandeur du coup n'a pas pour effet de diminuer la vitesse du mouvement que les sujets (exemples : ANA., CAM. et MAP.) évoquent la stratégie qui consiste à donner un coup en sens contraire du mouvement. De même, c'est parce que l'orientation finale ne correspond pas à l'orientation anticipée (Of opposée à Oi) qu'ils sont amenés (exemples : MAT. et HEL.) à découvrir qu'un coup donné en direction opposée à celle du mouvement peut avoir pour effet de diminuer sa vitesse sans changer son orientation.

2/ Différenciation du schème à travers ses applications

L'application de ces procédures nouvellement construites à des situations variées va permettre leur différenciation. C'est en utilisant les connaissances acquises au cours de l'exploration que les sujets en arrivent à comprendre ou à inférer que, s'il faut donner le coup en sens contraire du mouvement pour diminuer sa vitesse, le coup peut également avoir pour effet, à la fois de modifier de 180 degrés l'orientation du mouvement, et d'augmenter ou de diminuer sa vitesse, tout dépendant de la relation entre la grandeur du coup et la vitesse initiale. Cette "relativisation" de l'effet du coup en fonction de sa grandeur, qui permet de coordonner les changements de vitesse et d'orientation, va conduire à l'identification de cas particuliers intéressants : celui où la balle s'arrête, la grandeur du coup étant égale à la vitesse initiale, et celui où la balle conserve sa vitesse initiale, tout en modifiant son orientation de 180 degrés, la grandeur du coup étant égale au double de la vitesse initiale. Ces cas particuliers, qui sont en quelque sorte un produit des "coordinations" ou mises en relation effectuées par le sujet au sein même du schème unidimensionnel, sont sources d'observations nouvelles qui vont jouer un rôle important dans la coordination ultérieure de ce schème avec les autres schèmes (i.e. moyenne et écart).

C'est donc en corrigeant leurs anticipations initiales à la lumière des résultats de leurs manipulations que les sujets parviennent à relier entre elles des composantes de la situation qui étaient antérieurement dissociées. Lorsque les résultats obtenus ne correspondent pas à leurs anticipations ou aux buts visés, les sujets sont amenés à rejeter certaines hypothèses ou représentations (exemple : *si je donne un petit coup la vitesse ne diminue pas*) et à en conserver d'autres sous une forme modifiée ou relativisée (exemple : *si je donne un coup en direction opposée à celle du mouvement, la balle change d'orientation mais seulement si la grandeur du coup est supérieure à la vitesse initiale*).

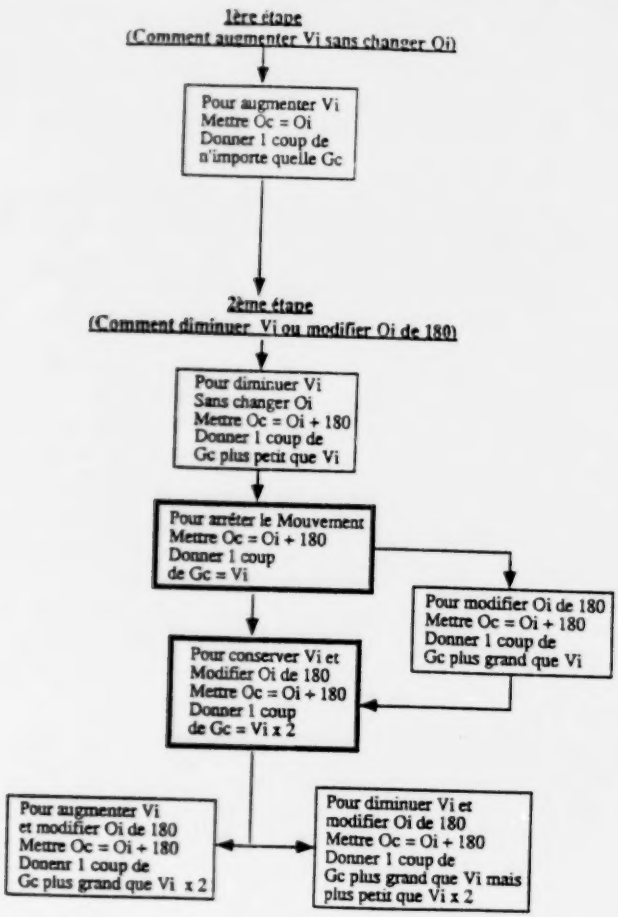
L'exploration des situations unidimensionnelles leur permet de discriminer, parmi les divers éléments de connaissance successivement évoqués, quels sont ceux qui sont pertinents et comment les utiliser. Tous ces sujets connaissent les opérations d'addition et de soustraction, ils savent également que l'écart entre deux orientations opposées l'une à l'autre est de 180 degrés. Mais ce n'est que progressivement qu'ils parviennent à utiliser convenablement ces divers éléments de connaissance. La construction du schème unidimensionnel, qui peut être considérée comme un premier palier

d'équilibre, consiste précisément à mettre en relation les éléments de connaissance (addition et soustraction algébriques, écart entre deux orientations opposées) nécessaires à la compréhension des changements de vitesse et d'orientation, en les intégrant à une seule et même représentation d'ensemble. Celle-ci permet aux sujets de faire plusieurs inférences. La capacité d'arrêter le mouvement de la balle ou de modifier son orientation de 180 degrés, tout en conservant sa vitesse, reflète la compréhension de la réversibilité des actions en jeu.

On peut voir, dans ces constructions nouvelles, les produits d'une coordination entre "observables" (i.e. caractéristiques associées au mouvement initial, au coup et au mouvement final) antérieurement dissociés. C'est ce que Piaget appelle le passage des constatations aux inférences et aux déductions, processus inhérent à l'équilibration, c'est-à-dire à la formation de connaissances nouvelles. En d'autres termes, ce qui donnait lieu à des observations dissociées, à une première étape d'indifférenciation, apparaît sous une forme coordonnée dans le schème unidimensionnel. Et ce qui, au niveau du schème unidimensionnel, apparaît comme le résultat d'une mise en relation, ou "coordination", d'observables antérieurement dissociés, interviendra ultérieurement, à titre d'"observable", dans la mise en relation entre eux des schèmes qui vont progressivement se construire.

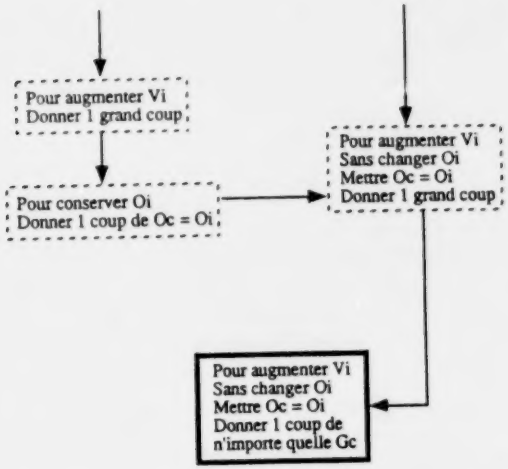
Les tableaux, présentés dans les pages suivantes, résument la succession des principales stratégies conduisant à la construction du schème unidimensionnel. Le premier tableau résume les deux grandes étapes de construction du schème. Les second et troisième tableaux présentent la succession des principales stratégies observées à chaque étape. On peut voir que ce qui donne lieu à des constructions successives, lors de la formation du schème, va se retrouver simultanément intégré et organisé à l'intérieur du schème, une fois celui-ci constitué.

Tableau 4: Principales étapes de construction du schème unidimensionnel



Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

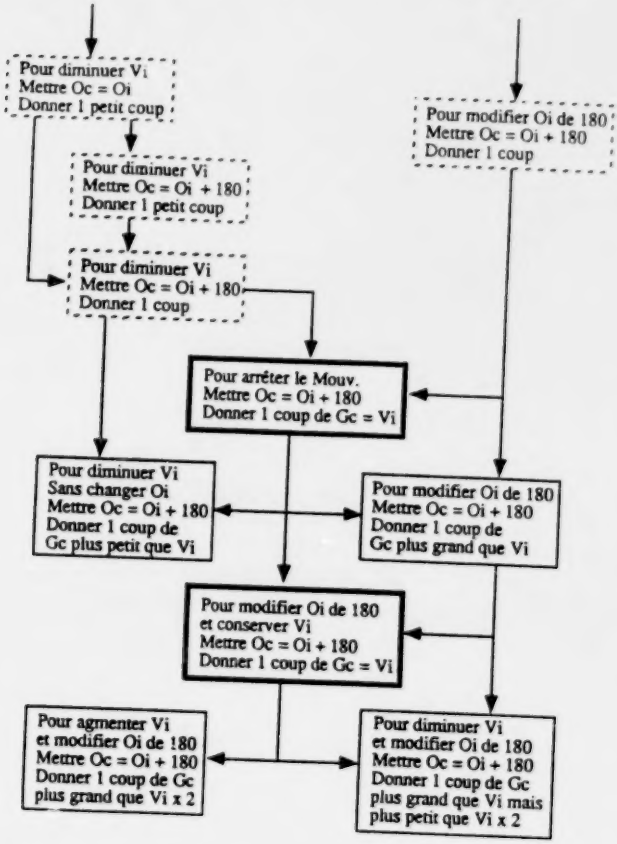
Tableau 5: Principales stratégies observées à la 1ère étape de construction du schème unidimensionnel



Stratégies pour augmenter Vi sans changer Oi

Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

Tableau 6: Principales stratégies observées à la 2ème étape de construction du schème unidimensionnel



Stratégies pour diminuer Vi sans changer Oi ou modifier Oi de 180

Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

CHAPITRE 7

CONSTRUCTION DU SCHÈME DE LA MOYENNE

7.1 Phase II : Exploration des changements d'orientation bidimensionnels

L'exploration des changements d'orientation dans les situations bidimensionnelles se fait en deux étapes : avec le système des coups d'abord, puis avec le système des flèches. Elle débute à la séance 2 pour neuf (9) sujets sur dix (10) et à la séance 3 pour un (1) sujet (MAP., Sec. III, Grpe 1) qui a mis plus de temps que les autres à découvrir les relations en jeu dans les situations unidimensionnelles.

L'exploration du système des flèches dure une séance complète. Elle se fait à la séance 4 pour les sujets du premier groupe et à la séance 3 pour les sujets du second groupe. On revient ensuite au système des coups pour achever l'exploration des changements d'orientation bidimensionnels puis entamer la troisième phase d'exploration. Dès la séance 2, la majorité des sujets a commencé à explorer les changements d'orientation bidimensionnels avec le système des coups. Il nous a donc semblé pertinent d'introduire le système des flèches un peu plus tôt avec le second groupe. Ce système est en effet conçu pour faciliter la compréhension des relations en jeu dans les changements d'orientation bidimensionnels.

Nous présenterons d'abord l'exploration des changements d'orientation avec le système des coups, pour chacun des deux groupes, puis l'exploration du système des flèches pour chacun des deux groupes également.

A. Exploration du système des coups

7.1.1 Sujets de secondaire III

1/ Anticipations spontanées

On commence par demander aux sujets d'anticiper ce qui va se passer si l'on donne un coup dans une orientation différente de celle du mouvement. Ceci permet de voir dans quelle mesure les sujets tiennent compte du mouvement initial, dans l'anticipation des effets du coup, et quelles sont les relations qu'ils établissent spontanément entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement.

Voici quelques exemples reflétant leurs représentations initiales.

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - As-tu une idée de ce qui va se passer si tu donnes un coup dans une orientation différente de celle de ta balle ? - *La direction de la balle va changer. Si je la mets à 90, je pense qu'elle va aller à 90... C'est presque horizontal mais pas complètement. Moi j'aurais cru que ce serait allé à 90 complètement, pas à 85...* - Après être revenue à la situation de départ, soit Vi = 20 et Oi = 45, elle donne successivement plusieurs coups de même grandeur à 0 degré - *... je ne comprends pas pourquoi ça diminue de si petit. Tout à l'heure, le premier coup que j'ai donné, c'est passé de 45 à 12, après ça, ça descend de plus en plus lentement. Je ne comprends pas pourquoi l'orientation change de moins en moins... Il faudrait que je donne beaucoup de coups pour arriver à 0... je ne comprends pas pourquoi ça ne pourrait pas arriver à 0.* - Elle a donc de la difficulté à comprendre pourquoi l'orientation finale ne correspond pas à celle du coup.

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - Tu avais vu ce qui se passait quand tu donnais ton coup dans la même orientation que le mouvement ou en direction opposée... Si, maintenant, tu le donnes dans une orientation différente, sais-tu ce qui va se passer ? - *Je sais que deux nombres contraires, il y en a un qui va faire augmenter et l'autre diminuer la balle* (i.e. l'orientation) *et la grandeur, ça va faire que ça va augmenter ou diminuer de beaucoup, c'est tout ce que je sais... Disons que je prenais deux chiffres contraires, 0 puis 180, je ne sais plus lequel, disons 0 faisait augmenter l'orientation et 180 la faisait diminuer puis si la grandeur était de 10, ça augmentait ou diminuait un petit peu et si la mettais à 90, ça augmentait ou diminuait de beaucoup.* - Elle se contente donc d'évoquer des relations globales qu'elle avait établies à la séance un, en relation avec des situations particulières.

MAP., Sec. III, Grpe 1 (séance 3) - La balle ayant une vitesse de 20 et une orientation de 45, on lui demande d'anticiper ce qui va se passer si elle donne un coup dans une orientation différente de celle du mouvement. - *La vitesse va augmenter de 20 et l'orientation... elle va prendre l'orientation que j'ai.* - Pour un coup de Oc = 270, elle anticipe une orientation finale vers la gauche, donc identique à celle du coup et elle n'arrive pas à interpréter le résultat. - *Si je lui donne dans une certaine orientation, elle change d'orientation... mais...*

CAM., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - Si tu donnes un coup dans une orientation différente de celle du mouvement, ni la même, ni l'opposé, as-tu une idée de ce qui va se passer ? - *Elle va changer de direction...* - Ayant donné un coup de Oc = 55 sur

un mouvement initial de Oi = 225, elle n'arrive pas à expliquer le changement d'orientation.

MAT., Sec.III, Grpe 1 (séance 2) - On lui demande si elle serait capable d'envoyer la balle dans une orientation différente de celle du mouvement ou de son opposée. Cette intervention, qui consiste à faire anticiper des actions plutôt qu'un résultat, a pour effet d'induire une stratégie complexe, mais erronée, qu'elle va chercher à tester pendant pratiquement toute la séance. Partant du cas particulier dans lequel elle a réussi à conserver la vitesse de la balle en modifiant son orientation de 180 degrés (situation unidimensionnelle), elle essaie de déterminer quelle grandeur donner à son coup pour modifier l'orientation, non plus de 180 degrés mais de 185 degrés, tout en conservant la vitesse. - *Là, la vitesse est de 20 et l'orientation de 45. Si je faisais mon opposé, ça ferait 225. Supposons que je la mets à... 5 de plus que l'opposé, 45 + 185...* - Qu'est-ce que tu veux faire exactement ? - *... je cherche de combien de plus que le double* (sous-entendu, mettre la grandeur). *Le double je sais que c'est 40 qu'il faudrait que je mette pour que ça change d'orientation. Je mettrais 40, 20 pour l'immobiliser, 20 pour la faire repartir puis, comme je n'ai pas mis 180 mais 185, il faudrait que je cherche le 5 de plus, c'est comment sur mon 20... Si je trouve 6, supposons, ça voudrait dire qu'il me faut 20 pour arrêter ma balle puis ça me prendrait 26 pour que mon orientation change vraiment de bord.* - À partir de ses calculs, elle choisit un coup de Gc = 51.4 et s'attend à obtenir une vitesse finale de 31.4 (soit 51.4 - 20) et une orientation finale de 230 (égale à Oc). Elle obtient une vitesse de 31.52 et une orientation de 233.16, résultats qu'elle juge suffisamment proches de ceux qu'elle anticipait pour ne pas renoncer tout de suite à cette stratégie, pourtant incorrecte.

On constate qu'aucune étudiante de secondaire III ne se représente correctement les changements d'orientation bidimensionnels. Elles ont tendance à généraliser aux situations bidimensionnelles les relations qu'elles ont établies dans les situations unidimensionnelles. Lorsqu'on leur fait anticiper l'effet d'un coup donné dans une orientation différente de celle du mouvement initial, plusieurs d'entre elles ne voient pas pourquoi l'orientation finale ne serait pas identique à celle du coup. Faute de tenir compte du mouvement initial et de différencier les situations unidimensionnelles et bidimensionnelles, ces sujets ne sont pas en mesure de comprendre en quoi la grandeur du coup, ou le nombre de coups, affectent eux aussi le changement d'orientation. Ainsi, dans un premier temps, leurs manipulations les amènent tout au plus à constater que l'orientation finale ne correspond pas à celle du coup et que, même en donnant un très grand nombre

de coups, l'orientation de la balle ne fait que se rapprocher de celle du coup sans jamais l'atteindre.

Le cas de MAT. est un peu particulier puisqu'aucun autre sujet n'a recours à ce type de stratégie. Mais il reflète lui aussi une certaine confusion de l'unidimensionnel et du bidimensionnel. Par ailleurs, il permet de mettre en évidence l'importance de la formulation d'une intervention dans l'induction de stratégies, anticipations ou raisonnements. On constate en effet, qu'à cette étape, il s'avère préférable de faire anticiper aux sujets les résultats d'une action (i.e. *"Que va-t-il se passer si tu donnes un coup dans une orientation différente de celle du mouvement"*) que de leur demander de trouver les actions permettant de produire un résultat (i.e. *"Que faut-il faire pour envoyer la balle dans une orientation différente de celle du mouvement"*).

2/ Découverte de la moyenne

Les interventions qui ont lieu par la suite vont consister à centrer l'attention du sujet sur les cas les plus simples, c'est-à-dire ceux où la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, dans le but de faciliter la découverte d'une relation entre l'orientation initiale (Oi), celle du coup (Oc) et l'orientation finale (Of).

Voici d'abord quelques exemples de conduites observées lorsqu'on suggère aux sujets d'essayer un coup de même grandeur que la vitesse ou, encore, d'obtenir une certaine orientation finale :

MAP., Sec. III, Grpe 1 (séance 3) - Après que la balle ait été immobilisée avec la clé "C", on lui suggère de donner un coup de grandeur 20 à 0 degré puis d'en donner un second à 90 degrés. - *Pour moi, elle va aller à 45... peut être pas exactement mais...* - Pourquoi elle n'ira pas à 90 ? - *Parce qu'elle allait déjà tout droit.* - Dans cette situation, où l'orientation initiale est de 0 degré et celle du coup, symétrique à celle du mouvement, elle arrive donc à prévoir approximativement l'orientation finale.

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - La balle ayant un mouvement initial à 0 degré, on lui de demande de prévoir ce qui va se passer si elle donne un coup de même grandeur que la vitesse, mais dans une orientation différente. - *Je ne sais pas, il me semble que si je lui donne un coup par là* (i.e. à 90 degrés) *et qu'elle va déjà par en haut* (0 degré), *elle va aller dans le milieu...* - Sais-tu pourquoi la balle n'est pas allée à 90 degrés ? - *... la balle allait déjà par en haut, elle ne pouvait pas tout de suite aller à 90.* -

Est-ce qu'on peut dire que, quand tu donnes un coup à ta balle, il faut que tu tiennes compte de son mouvement ? - *Oui, je viens juste de comprendre ...*

ANA., Sec. III, Grpe 1 (séance 2) - La balle ayant une vitesse de 20 et une orientation de 45 degrés, on lui suggère d'essayer un coup de même grandeur que la vitesse, mais dans une orientation différente. Elle choisit un coup à 90 degrés. - Ta balle avait une orientation de 45 et tu as donné ton coup à 90 degrés. C'est quoi maintenant son orientation ? - *67.5... c'est peut être environ entre les deux... elle va un peu plus vite...* - Tu remarques qu'elle n'est pas allée à 90 degrés... Si on revenait à la situation de départ (soit Vi = 20 et Oi = 45), qu'est-ce que tu pourrais faire pour qu'elle aille à 90 ? - *Lui donner une orientation plus grande que 90 peut-être, parce que quand je veux essayer d'aller à 90, elle va un peu moins, alors si je veux qu'elle aille à 90, si je lui donne une orientation plus grande, peut-être qu'elle va y aller mais je garde la même grandeur de coup.* - Tu lui donnerais une orientation plus grande que 90 ? Laquelle ? - *Bien, entre les deux... quand j'étais à 45 et que je lui ai donné à 90 elle est allée entre les deux. Si je veux qu'elle aille à 90, c'est peut-être juste entre les deux ici... je vais essayer entre 90 et 180, à 135... ça marché.*

CAM., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - Elle vient de constater qu'en donnant un coup dans une orientation différente de celle du mouvement, l'orientation finale ne correspond pas à celle du coup. Après qu'elle soit revenue à la situation de départ (Vi = 20 et Oi = 45), on lui suggère d'essayer d'obtenir une Of de 90 degrés. - *Je me servirais de la manière que j'ai pris pour l'envoyer à l'opposé... ça, c'est 180... 45 + 180 = 225... 180 divisé par 4, ça fait 45...* - (Elle choisit une orientation de 135, soit 90 plus 45, mais sans expliquer clairement pour quelle raison, puis elle choisit un coup de Gc = 15, donc inférieur à Vi qui est de 20.) - Qu'est-ce que tu observes ? - *C'est pas 90 (Vf est de 81.88) ... ça doit être la grandeur du coup... elle n'a pas eu le temps de se rendre... il faudrait mettre une grandeur de 20... Elle va à 90* - Comprends-tu pourquoi tu as obtenu l'orientation que tu recherchais ? - *Je ne sais pas comment l'expliquer.* - (Elle a un peu de difficulté à formuler elle-même une explication, mais elle semble néanmoins comprendre la relation en jeu).

Cette mise en situation amène les sujets à découvrir la nécessité de tenir compte du mouvement initial, dans l'anticipation des effets du coup, et à établir une première relation (moyenne ou milieu de l'écart) entre les caractéristiques du coup, celles du mouvement initial et celles du mouvement final. CAM. intuitionne assez vite qu'il existe une relation entre Oi, Oc et Of, puisqu'elle choisit spontanément de donner une Oc telle

que l'écart entre Oc et Of soit le même qu'entre Oi et Of. La plupart des sujets constatent assez facilement que l'orientation finale se situe dans le milieu, c'est-à-dire à mi-chemin de l'orientation initiale et de celle du coup. Quatre sujets sur 5 relient très rapidement ce milieu à une "moyenne" de l'orientation initiale et de celle du coup. Cette relation s'avère particulièrement facile à abstraire lorsque l'orientation initiale est à 0 degré, celle du coup étant symétrique (90 degrés) à celle du mouvement. Cela pose un peu plus de difficulté à deux d'entre eux.

Ainsi, par exemple, MAP. n'arrive pas à calculer l'orientation finale avec précision lorsque l'orientation initiale diffère de 0 degré, car elle se contente de diviser par deux l'orientation du coup. Si elle prévoit correctement que la balle devrait aller "dans le milieu" et parvient à situer approximativement l'orientation de la balle sur l'écran, elle ne relie pas spontanément ce milieu à une "moyenne" de l'orientation initiale et de celle du coup. Ce n'est qu'au terme de la séance 3, après quelques explications un peu plus systématiques sur la façon de mesurer l'orientation finale à partir d'une orientation initiale différente de 0 degré, qu'elle comprend la relation "arithmétique" (moyenne ou milieu de l'écart) entre l'orientation initiale et celle du coup.

3/ Différenciation de l'effet du coup en fonction de sa grandeur

La découverte d'une relation entre l'orientation du coup et celle du mouvement initial permet aux sujets de faire de nouvelles anticipations à propos des changements d'orientation (par exemple, *"la balle va aller dans le milieu"*) ou, encore, d'utiliser de nouvelles stratégies pour essayer de modifier l'orientation initiale d'une certaine valeur (par exemple, trouver la moyenne de Oi et de Oc ou mesurer l'écart entre ces deux orientations et le diviser par deux). Toutefois, les stratégies et/ou anticipations des sujets révèlent qu'à cette étape, le fait que l'orientation finale se situe "dans le milieu" n'est pas nécessairement relié à l'égalité de la grandeur du coup et de la vitesse initiale.

Voici quelques exemples.

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - La balle ayant une orientation de 90, on lui demande si elle saurait quelle grandeur et quelle orientation donner à son coup pour obtenir une orientation finale de 135 degrés. - ... *Je ne veux pas que la grandeur* (i.e. vitesse) *change, je veux juste que ce soit l'orientation, puis je veux qu'elle aille à 135. Je vais donner mon coup à 180 parce que 135, c'est le milieu de 90 et de 180.* - Elle donne son coup et constate que l'orientation finale n'est pas celle qu'elle anticipait. - Est-ce que tu crois que c'est ton orientation ou ta grandeur qui n'était pas la bonne ? - *C'est peut-*

être justement à cause de la grandeur... je ne sais pas. J'aurais cru que l'orientation allait être comme la première fois. C'était allé au milieu. - On lui fait réaliser que, cette fois, elle n'a pas mis la grandeur du coup égale à la vitesse. Elle essaie de nouveau en égalisant Gc avec Vi. - *Il faut que je donne la même grandeur que la vitesse et l'orientation que je veux, il faut que ce soit le milieu entre l'orientation que j'ai déjà et le coup que je vais donner.*

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - Elle vient de constater, après avoir donné un coup de même grandeur que la vitesse, que la balle va dans le milieu. On lui demande d'anticiper ce qui va se passer si elle donne un autre coup. - *Elle irait au milieu, entre 45 et 90 je pense... je vais l'essayer... elle n'est pas exactement dans le milieu...* - Pourquoi elle n'est pas allée dans le milieu tu crois ? - *À cause de la grandeur peut-être... parce que je ne lui ai pas donné un gros coup. Alors il a gardé plus du mouvement précédent.*

On constate qu'après avoir découvert comment évaluer l'orientation finale, la grandeur du coup étant égale à la vitesse initiale, les sujets demeurent initialement centrés sur la relation entre les orientations et ont tendance à négliger plus ou moins sa grandeur, c'est-à-dire à ne pas différencier l'effet du coup sur le changement d'orientation selon qu'il est ou non de même grandeur que la vitesse. Toutefois, la confrontation entre anticipations et résultats, dans les situations où la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale, conduit assez rapidement à la découverte du rôle de la grandeur du coup, en référence à la situation où la balle va "dans le milieu" ("moyenne").

Voici quelques exemples d'explications ou d'interprétations que donnent les sujets.

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 4) - Comment interprètes-tu les changements d'orientation à partir de ce que tu viens d'observer ? - *Je me dis que si la grandeur est comme la vitesse, elle va aller complètement au milieu, parce que c'est comme si les deux étaient équivalents. Mais si la grandeur du coup est moins forte... ça va plus rester à ce que c'était déjà et si elle est plus forte encore que la vitesse, ça va plus aller vers l'orientation qu'on a mis* (soit Oc).

CAM., Sec. III, Grpe 2 (séance 4) - *Si la grandeur du coup est moins grande que la vitesse, elle ne se rendra pas dans le milieu puis, si elle est plus grande, elle va dépasser le milieu.*

NAD, Sec. III, Grpe 2 (séance 2) - *J'ai l'impression qu'entre l'orientation que je donne et celle qu'elle a déjà, elle va aller au milieu de ça, selon la grandeur du coup et la vitesse qu'elle a déjà. Si la grandeur est plus petite que la vitesse qu'elle a déjà, elle va aller plus proche du mouvement qu'elle avait précédemment...*

Ainsi, la différenciation du rôle de la grandeur et sa mise en relation avec celui de l'écart entre les orientations (Oi et Oc) leur permettent de situer approximativement l'orientation finale par rapport à la moyenne ou au milieu de l'écart, selon que la grandeur du coup est inférieure (*"avant le milieu"*) ou supérieure (*"après le milieu"*) à la vitesse initiale.

4/ Confrontation à des situations conflictuelles

Si le "schème de la moyenne" semble acquis à partir du moment où le sujet est parvenu à délimiter son champ d'application, c'est-à-dire à différencier l'effet du coup sur le changement d'orientation en fonction de sa grandeur, et à prévoir approximativement, en référence à la moyenne, l'effet de coups de grandeurs différentes de la vitesse, on constate que certaines situations auxquelles on confronte le sujet soulèvent parfois quelques difficultés.

a) Situation où l'on cherche à obtenir une Of à 90 degrés de Oi

Voici d'abord quelques exemples illustrant la confrontation à ce type de situations :

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 4) - La balle ayant une orientation initiale de 45 degrés, on lui demande si elle serait capable d'obtenir une orientation finale de 135 (soit à 90 degrés de Oi). - *Je me dis qu'il faudrait que je trouve l'écart qu'il y a entre 45 et 135 et l'additionner à 135 pour que ce soit le milieu... L'écart qu'il y a entre 45 et 135, c'est 90 degrés... 135 + 90, ça va donner 225, c'est ça. Alors, il faudrait que je donne une orientation à 225, ça va me donner 135.* - Elle donne son coup puis constate que la balle s'arrête. - *Elle s'est arrêtée...* - Comment tu peux expliquer cela ? - *Ah je pense que c'est parce que j'ai donné le coup opposé complètement, alors ça arrêté ma balle... ça doit être parce que c'est l'opposé de l'orientation que j'avais déjà...! Ça veut dire que ma balle ne pourrait pas aller à 135 parce que, pour la faire aller à 135, il faudrait que je mette l'orientation à 225 puis elle s'arrête.*

NAD., Sec III, Grpe 2 (séance 4) - On lui suggère de revenir à la situation de départ (Vi = 20 et Oi = 45) puis d'essayer d'obtenir une orientation finale de 135 degrés ?

- *... Je mettrais ma grandeur à 20, puis l'orientation... je ne sais pas... ça l'arrêterait...* - Tu te demandes quelle orientation tu pourrais donner à ton coup ? - *Oui, 135, ce serait le milieu de 45 et de 225 mais si je mettais à 225, elle s'arrêterait.*

CAM., Sec. III, Grpe 2 (séance 4) - Après avoir constaté que ça ne marche pas parce que la balle s'arrête, elle revient à la situation de départ et essaie de nouveau avec un coup de grandeur 40. - *J'ai donné le double... il est allé à l'opposé...* - Est-ce que tu crois que c'est possible de l'envoyer à 135 quand Gc = Vi ? - *Non...* - Pourquoi ? - *C'est parce que c'est dans le sens contraire, ça l'arrête. Si le coup est moins grand ça va la ralentir et s'il est plus grand, ça va l'envoyer dans le sens contraire. Alors il faudrait que je change l'orientation...*

En général, les sujets commencent par "tomber dans le piège", c'est-à-dire qu'ils choisissent tout naturellement un coup à 180 degrés du mouvement initial sans réaliser, avant de l'essayer, qu'un tel coup aura pour effet, non pas de modifier l'orientation initiale de 90 degrés, mais d'arrêter le mouvement. Constatant que "la balle s'arrête", quelques sujets (exemple : CAM., Grpe 2) cherchent quand même à obtenir l'orientation anticipée, en faisant varier la grandeur du coup, avant de faire le lien avec la situation unidimensionnelle où l'on donne le coup en direction opposée à celle du mouvement.

Cette confrontation les amène d'abord à réaliser qu'on ne peut modifier l'orientation initiale de 90 degrés ou plus, quand la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, puis à en comprendre les raisons (conflit avec la situation unidimensionnelle où l'on donne un coup de même grandeur que la vitesse, en direction opposée à celle du mouvement). Certains sujets arrivent même à se représenter qu'il y a tout un "champ" de 180 degrés à l'intérieur duquel on ne peut envoyer la balle lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse. Cette situation demeure cependant conflictuelle pour une étudiante (MAT.) qui ne comprend pas encore très bien pourquoi, dans certains cas, la balle va dans le milieu et, dans d'autres cas, elle s'arrête. Cette difficulté semble refléter une différenciation insuffisante entre situations unidimensionnelles et situations bidimensionnelles.

b) Situations dans lesquelles l'écart entre Oi et Oc est supérieur à 180 degrés

D'autres situations, qui s'avèrent poser des difficultés à plusieurs sujets, sont celles dans lesquelles l'écart entre l'orientation du coup et celle du mouvement initial est supérieur à 180 degrés lorsqu'on le calcule à partir de l'orientation initiale.

Voici quelques exemples illustrant les types de tâtonnements effectués par les sujets :

CAM., Sec. III, Grpe 2 (séance 4) - La balle ayant une vitesse de 20 et une orientation de 45, on lui demande de prévoir l'effet d'un coup donné vers la gauche, ce qui correspond à une orientation de 270 degrés sur l'écran. Elle anticipe une Of de 112.5 - Tu peux m'expliquer comment tu l'a calculée ? - *J'ai soustrait la différence entre les deux, entre 45 et 270, pour voir c'était quoi l'écart puis je l'ai divisé en deux... après j'ai cherché le milieu.* - Elle donne son coup, mais constate que l'orientation finale n'est pas celle qu'elle anticipait. - *Elle a ralenti... donc on a donné le coup en sens contraire...* - Tu veux dire que tu as donné le coup proche de l'opposé ? Et comment expliques-tu qu'elle ait cette orientation là (i.e. 337.5) ?... Ça ne donne pas ce que tu avais calculé ? - *Non* - As-tu l'impression qu'elle va dans le milieu ? - *Oui...* - Mais ce n'est pas ce que tu avais calculé ? - *C'est ça.* - Tu vois un lien entre l'orientation que tu avais prévue et celle que tu as obtenue ? - *Oui... j'ai fait le contraire... c'est parce que... c'est un peu plus que 180 degrés... Ça va dans le sens contraire après 180 degrés.*

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 4) - On lui demande de prévoir l'effet d'un coup à 270 degrés sur un mouvement initial à 45 degrés. - *Elle va aller vers ici, pas complètement à 180 degrés, un peu moins je pense, mais je ne saurais pas vraiment...* - Elle donne son coup. - *Je n'ai pas été capable de prévoir où elle irait... je ne sais pas... C'est peut-être parce qu'on est allé complètement à l'opposé... comme dans un autre quadrant alors elle a changé, elle est allée vers le haut. Je pensais qu'elle irait dans le milieu ici* (i.e. entre 45 et 270) - Puis elle n'est pas allée dans le milieu ? - *Non... ah bien, peut-être...! C'est parce que je pensais qu'elle irait dans le milieu vers ici* (entre 45 et 270) *puis elle est allée dans le milieu ici* (entre 270 et 45)... *Sûrement que c'est encore le milieu entre 45 et 270 mais au lieu d'être dans ce sens là* (vers le bas), *c'est dans ce sens là... (vers le haut) puis elle est allée un peu plus lentement.*

Tous les sujets, sauf un (NAD., Sec.III, Grpe 2), évaluent spontanément l'orientation finale en calculant le milieu de l'écart formé par l'orientation initiale et par

celle du coup. Ils ne semblent pas réaliser, d'une part, que l'écart maximum entre deux orientations est de 180 degrés et, d'autre part, que l'écart est "symétrique", c'est-à-dire qu'à tout écart dans un sens, correspond un même écart dans l'autre sens (exemple : par rapport à 0 degré, l'écart est le même entre 360 ou 0 et 45, et entre 315 et 0 ou 360). Cette stratégie a donc pour effet de générer des anticipations qui sont contredites par les résultats du coup puisque l'orientation obtenue s'avère être différente de (en fait, opposée à) celle qu'ils avaient anticipée. Quelquefois, les sujets visualisent correctement quelle devrait être l'orientation finale, sur l'écran, mais ils ne comprennent pas très bien comment la calculer à partir des valeurs associées au mouvement initial et au coup.

Aussi, ces situations peuvent-elles donner lieu à quelques tâtonnements et à diverses hypothèses avant que les sujets ne réalisent, parfois à l'aide d'explications, qu'il faut mesurer l'écart en sens inverse des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire entre l'orientation du coup et celle du mouvement, et non vers la droite à partir du mouvement initial. L'exploration de ces situations les amène à maîtriser davantage la compréhension des changements d'orientation dans les situations bidimensionnelles en relation avec le caractère "symétrique" de l'écart. Ils découvrent en effet qu'à partir du moment où l'orientation du coup "dépasse" l'orientation opposée à celle du mouvement, l'écart se mesure "en sens inverse", soit entre Oc et Oi et non plus à partir de Oi.

Au terme de cette seconde phase d'exploration, 4 sujets sur 5 sont parvenus à reconstituer les principales relations constitutives du schème de la moyenne. Ceci leur permet de prévoir l'orientation finale, avec précision, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale et, approximativement, lorsqu'elle est différente. Seule une étudiante de secondaire III (MAT., Grpe 1) ne différencie pas encore l'effet du coup sur le changement d'orientation en fonction de sa grandeur et ne comprend pas très bien la situation dans laquelle on ne peut modifier l'orientation de 90 degrés ou plus, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale. Cette exploration s'avère plus ou moins longue selon les sujets. Elle dure, en moyenne, de une séance et demi à deux séances. Le fait que l'exploration dure plus longtemps est généralement davantage relié à l'ampleur des difficultés rencontrées par le sujet qu'au niveau de raffinement auquel on se rend.

7.1.2 Sujets de secondaire V

1/ Anticipations spontanées

Contrairement aux sujets de secondaire III qui, au départ, ne tenaient pas compte du mouvement initial dans l'anticipation des changements d'orientation, les sujets de secondaire V comprennent tous plus ou moins la nécessité de tenir compte de l'orientation que la balle a déjà. La plupart ont même recours à des éléments de connaissance relatifs aux vecteurs pour anticiper ou expliquer les résultats du coup. Par ailleurs, ils évoquent tous, avec plus ou moins de précision, la notion de "moyenne", c'est-à-dire l'idée selon laquelle l'orientation finale devrait se situer dans le "milieu". Il existe cependant des différences interindividuelles dans le degré de raffinement des représentations évoquées et dans la façon dont celles-ci sont utilisées.

Deux étudiantes se montrent d'emblée capables de faire des anticipations qualitatives assez justes des changements d'orientation dans différentes situations qu'elles ont elles-mêmes générées.

Voici des exemples illustrant leurs anticipations et explications.

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 2) - Elle choisit spontanément de donner un coup de même grandeur que la vitesse, dans une orientation différente de celle du mouvement. - *Je veux voir ce qui se passe quand je mets la même grandeur et une orientation différente. Je mets l'orientation à 90... si je donne une grandeur de 20, ça devrait aller... disons aux alentours de 62, 63...* - Elle donne son coup et on lui demande si elle comprend pourquoi l'orientation est de 67.5. *C'est que ça se joue en vecteurs justement. Si elle avait été immobile, elle serait allée à 90. Mais comme elle a un déjà un mouvement, je n'annule pas complètement, j'ajoute au mouvement, ça va entre les deux.* - Est-ce que tu aurais pu prévoir avec exactitude que l'orientation finale serait de 67.5 ? - *Oui, j'avais prévu en comptant mal. C'est parce que comme mes vitesses étaient les mêmes, mes vecteurs étaient donc de la même grandeur, donc on savait que si on le fait à l'échelle, la somme des deux fait que l'angle va se trouver dans le milieu. Mais c'est la vitesse que je n'aurais pas pu prévoir.* - On lui demande ensuite ce qui va se passer si la grandeur du coup n'est plus égale à la vitesse initiale. - *Elle ne va pas exactement dans le milieu, parce que mes grandeurs étaient différentes... J'aurais pu prévoir l'angle encore avec le système des vecteurs... mais c'est plus difficile sans l'écrire, sans le dessi-*

ner, de voir exactement ce que ça va donner. Je n'aurais pas pu dire comme ça. - Est-ce que tu aurais pu prévoir que l'orientation finale se rapprocherait du 90 degrés (soit de Oc) ? - *Oui, ma grandeur était plus grande, donc ma force était plus grande que celle que j'avais au départ. C'est elle qui agissait plus...* - Dans la situation où l'on donne un très grand nombre de coups dans une même orientation, mais différente de celle du mouvement, elle explique : *On ne peut pas annuler totalement l'orientation que la balle a déjà... même si on prend une force de un million, il reste toujours, même si c'est très peu, la vitesse de la balle.*

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 2) - Peux-tu prévoir ce qui va se passer si tu donnes un coup dans une orientation différente de celle de ta balle ? - *J'utiliserais des vecteurs sur papier. Je peux à peu près prévoir quelle direction. Supposons que je lui donne un coup d'une grandeur de 25 avec l'orientation 45* (Oi est de 90 et Vi est de 5) *je sais qu'elle va monter...* - Elle donne son coup. - *Elle n'a pas monté de 45 évidemment.* - Pourquoi ? - *Parce qu'elle avait déjà une orientation avec une certaine vitesse. Si mon mouvement était arrêté, c'est sûr qu'elle aurait pris une orientation de 45, parce que mon objet ne se déplaçait pas initialement. Mais là, elle se déplaçait... j'ai une orientation de 52... Je peux prévoir qu'elle va être un peu entre les deux.* - Elle essaie ensuite un autre coup de grandeur et d'orientation différentes de la vitesse et de l'orientation initiales. *Si je lui donne un coup de grandeur 10 ...et je lui donne une orientation de -45* (soit 315). *Donc mon coup partirait comme ça. Ce que je prévois, c'est qu'elle ait à peu près 10 d'orientation... Ah, 32... c'est plus que ce que je pensais. C'est parce que le coup était assez grand, puis elle a cherché à peu près le milieu.* - Bien que ses anticipations demeurent approximatives, dans les cas où la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale, elle comprend qu'il faut tenir compte à la fois de la grandeur et de l'orientation du coup, en rapport avec la vitesse et l'orientation initiales. Elle explique : *Il faut tenir compte, pour prévoir la direction finale de la balle après le coup, de l'orientation que la balle a déjà. Si on donne un coup dans une certaine orientation, il faut calculer d'après son orientation initiale puis d'après aussi la grandeur du coup... si je lui donne un coup dans une orientation de 90 et si la balle a déjà une orientation de 45, elle va aller entre les deux, tout dépendant de la force, de la grandeur du coup.*

Un autre sujet (LUC.) a également recours à la notion de vecteurs, et plus particulièrement à la représentation graphique des vecteurs, pour anticiper ou expliquer les résultats d'un coup donné dans une orientation différente de celle du mouvement.

Voici quelques exemples qui témoignent des représentations qu'elle évoque :

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 2) - Elle essaie de prévoir, en dessinant ses vecteurs, quel vecteur elle doit rajouter au mouvement initial pour obtenir une orientation finale de 180 degrés (Oi est de 45). Cette stratégie donne lieu à plusieurs tâtonnements consistant à rectifier tantôt la grandeur et tantôt l'orientation du coup. En dessinant ses vecteurs, elle explique : *J'essaie de trouver ma grandeur. Ma vitesse est de 53... quand je l'ai dessinée, ça m'a donné 5,3 cm puis ici, c'est ce qu'il faudrait que j'ajoute pour que j'aille à 180. J'ai trouvé mon chiffre* (Oc de 357), *puis j'essaie de trouver la grandeur du coup qu'il faut que je donne. J'ai 0,6... ce serait presque 32. C'est pas fini, il faut que je trouve mon x pour savoir la grandeur du coup que je donne. Je divise 53... il faudrait que je donne 0,6.* - Elle donne son coup puis constate : *Ça n'a pas assez changé mon vecteur...* - Après quelques essais, qui conduisent à des résultats plus ou moins satisfaisants, elle réalise qu'il serait sans doute plus facile d'évaluer le coup qu'elle doit donner, pour modifier l'orientation du mouvement d'une certaine valeur, si elle part d'un "vecteur coup" de même longueur que le "vecteur vitesse" initial (donc un coup de grandeur égale à la vitesse). Cette stratégie, qui fait appel à la représentation graphique des vecteurs, lui permet d'obtenir des approximations plus justes (179.93) du résultat anticipé (180).

Enfin, deux sujets évoquent spontanément l'idée selon laquelle l'orientation finale devrait se situer "dans le milieu", c'est-à-dire à mi-chemin de l'orientation initiale et de celle du coup, mais sans relier cette "moyenne" à l'égalité de la grandeur du coup et de la vitesse initiale.

Voici quelques exemples :

MAR., Sec. V, Grpe 2 (séance 2) - Elle veut obtenir une orientation finale de 90 degrés (Oi est de 45) en donnant au coup une orientation telle que l'orientation finale soit à mi-chemin de l'orientation initiale et de celle du coup. Mais cette stratégie ne lui permet pas d'obtenir le résultat anticipé parce qu'elle ne sait pas quelle grandeur donner au coup. Elle essaie donc successivement différentes grandeurs, mais sans songer à donner un coup de même grandeur que la vitesse. - Peux-tu relier le fait qu'elle soit plus proche de 45 (Oi) ou de 135 (Oc) à la grandeur que tu donnes à ton coup ? - *Oui, c'est sûr que quand tu donnes un plus grand coup dans une direction, s'il est plus fort, ça va être plus porté à aller vers l'orientation qu'on a donnée, tandis que s'il est plus petit, il va être moins porté à aller dans l'orientation qu'on a donnée...* - Tantôt tu as essayé une

grandeur plus petite que la vitesse et ça ne marchait pas, puis tu as essayé une grandeur supérieure à ta vitesse et c'était trop... - *Il doit y avoir un nombre, je ne sais pas s'il est juste exactement... pour que ça donne 90.* - Après avoir successivement donné un coup de grandeur 25 puis 30 (Vi est de 20), on lui suggère d'essayer un coup de même grandeur que la vitesse. - *Je pense que c'est ça... si c'est 20 et 20, ça va être plus porté à aller vers le milieu.*

HEL., Sec. V, Grpe 2 (séance 2) - Lorsqu'on lui demande d'anticiper ce qui va se passer si on donne un coup dans une orientation différente de celle du mouvement, elle explique : *La direction va changer. Si disons on donnait à 0, elle irait peut-être entre les deux environ... Si on a une direction comme ça (225) et qu'on donne un coup comme ça (0) ... il me semble qu'elle ne peut pas aller directement à 0...* - Est-ce qu'il y a une explication à cela ? - *Parce qu'elle a déjà une vitesse puis une orientation. Si je l'arrêtais, ça irait, mais elle a déjà quelque chose... Là elle est à 225 et je lui donne un coup à 0. Elle pourrait aller entre 270 et 0 degré environ, puis il faut que je donne une grandeur assez grande, sans cela elle ne bougera pas, elle va garder quand même son mouvement... si je donne un petit coup, elle ne le ressentira pas tellement...* - Lorsqu'on lui suggère d'obtenir une orientation finale de 90 degrés (Oi est de 45), elle essaie successivement plusieurs coups à 90 degrés, puis un coup d'orientation 135 mais, comme MAR., elle tâtonne avant de découvrir qu'il faut donner au coup une grandeur égale à la vitesse initiale pour que l'orientation finale se situe "dans le milieu". Par ailleurs, elle n'évoque pas, comme les autres sujets de secondaire V, la notion de "vecteurs".

Les représentations initiales des étudiantes de secondaire V ne sont donc pas de même niveau que celles des étudiantes de secondaire III. Deux d'entre elles (CHA. et CAR.) sont capables, dès le départ, de faire des anticipations approximatives assez justes des changements d'orientation ou d'expliquer les résultats du coup. En particulier, elles comprennent que "la balle va dans le milieu" si la grandeur du coup est égale à la vitesse (CHA.) et elles différencient très rapidement l'effet du coup sur le changement d'orientation en fonction de sa grandeur (CHA. et CAR.).

Les autres sujets font également référence à la "moyenne" mais, leurs anticipations se révèlent un peu moins précises et elles tâtonnent davantage. Ainsi, MAR. et HEL. (Grpe 2) évoquent spontanément l'idée selon laquelle l'orientation finale devrait se situer "dans le milieu", mais l'utilisation de cette représentation s'avère plus ou moins appropriée et donne lieu à divers tâtonnements. LUC. (Grpe 1) semble nettement privilégier un raisonnement par "addition graphique des vecteurs" puisqu'elle cherche à déterminer

les caractéristiques du coup ou à prévoir celles du mouvement final en dessinant effectivement ses vecteurs (flèches) "à l'échelle". Mais elle ne semble pas nécessairement réaliser qu'il y a des situations plus simples (cas où Gc = Vi) que d'autres (cas où Gc différente de Vi) où l'on peut prévoir l'orientation finale avec précision, à partir des valeurs associées à l'orientation initiale et à celle du coup, sans qu'il soit nécessaire de recourir à la représentation graphique des vecteurs.

2/ Découverte de la moyenne et différenciation de l'effet du coup en fonction de sa grandeur

Bien que tous les sujets de secondaire V évoquent l'idée de "moyenne", celle-ci n'est pas toujours reliée à l'égalité de Gc et de Vi et ne constitue pas nécessairement un "référent" stable en fonction duquel sont comprises les situations dans lesquelles la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale.

CHA. et CAR. différencient bien les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale de ceux où elle est différente et elles intègrent très vite, à travers leurs manipulations, la représentation des changements d'orientation, en référence à la moyenne, à leurs représentations initiales en termes de composition de vecteurs.

HEL. et MAR. découvrent seulement après plusieurs tâtonnements que la grandeur du coup doit être égale à la vitesse initiale pour que la balle aille "dans le milieu". Et c'est à partir de ce moment-là qu'elles parviennent à situer approximativement l'orientation finale, par rapport à la moyenne ou au milieu de l'écart, dans les situations où la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale.

Quant à LUC., si elle arrive à effectuer des approximations qualitatives de l'orientation finale en essayant de reproduire ses vecteurs à l'échelle, c'est seulement après plusieurs manipulations qu'elle découvre l'idée de "moyenne" ou de "milieu de l'écart", c'est-à-dire le fait que l'orientation finale se situe toujours dans le milieu, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, quelles que soient, par ailleurs, les orientations en jeu, et pas seulement lorsque l'orientation du coup est symétrique à celle du mouvement.

Voici quelques extraits de protocole illustrant la découverte progressive de cette relation.

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 3) - Le mouvement ayant une vitesse de 20 et une orientation de 45, on lui suggère d'obtenir une orientation finale de 90 degrés. - *90*

+ 45... ça doit être 135 plus ou moins. - Elle choisit une grandeur de coup égale à la vitesse initiale. - *Ça dépend encore, si je ne mets pas la même grandeur, je vais être obligée de calculer.* - Elle obtient le résultat anticipé et on lui demande pourquoi elle a choisi de donner un coup de même grandeur que la vitesse. - *Parce qu'en additionnant mes vecteurs... j'aurais pu mettre une grandeur différente, mais pour être sûre de ne pas me tromper, il aurait fallu que je fasse une règle de trois... j'aurais pu prendre toutes les orientations pour y arriver, mais il aurait fallu que je calcule ma grandeur.*

Dans cette situation, où l'orientation du coup est symétrique à celle du mouvement, elle arrive donc à prévoir correctement l'orientation finale sans passer par la représentation graphique de ses vecteurs. Elle comprend également qu'il y a plusieurs façons d'obtenir une même orientation finale en combinant au vecteur initial des vecteurs coups de différentes longueurs et orientations. Toutefois, bien qu'elle évoque spontanément, dans cette situation, la stratégie qui consiste à donner un coup de même grandeur que la vitesse, elle n'a pas explicitement recours à l'idée de "moyenne" ou de "milieu de l'écart" pour anticiper ou expliquer les résultats du coup et, dans plusieurs autres situations où l'on donne un coup de même grandeur que la vitesse, elle ne peut prévoir l'orientation finale avec exactitude, ni se passer de recourir à la représentation graphique de ses vecteurs. Elle ne semble pas encore réaliser qu'il y a des cas simples (quand Gc = Vi) où l'on peut toujours prévoir l'orientation finale avec exactitude à partir de la mesure de l'écart entre Oi et Oc.

Voici un exemple reflétant sa difficulté à découvrir la relation arithmétique entre Oi et Oc, permettant de prévoir l'orientation finale, avec précision, sans passer par la représentation graphique des vecteurs :

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 3) - Elle choisit de donner un coup de même grandeur que la vitesse dans une orientation différente (Oi est de 45 et Oc de 115). On lui demande si elle peut prévoir l'orientation finale (soit, 80) avec précision, sans dessiner ses vecteurs. Après avoir donné son coup, elle cherche une explication. - *Si on additionne 45 + 80, ça fait 125, 10 degrés de différence avec 115, puis si je soustrais 115 puis 45, ça fait 70, 10 degrés de différence avec 80...* - On lui suggère la situation plus simple où l'orientation initiale est de 0 degré. - *Si elle va à 0 et que je lui donne mon coup à 90, elle va aller à 45 puis il y a des flèches là dedans...* - Vois-tu une relation entre les trois orientations (soit, Oi, Oc et Of) ? - *... je ne sais pas... si j'additionne les trois, ça me donne 135...* - Ta balle va dans le milieu. Est-ce que c'est toujours le cas (quand Gc =

Vi) ? - Elle fait alors le raisonnement approprié qui consiste à mesurer l'écart, le diviser par deux et l'ajouter à Oi.

3/ Confrontation avec des situations conflictuelles

a) Situation où l'on cherche à modifier Oi de 90 degrés avec Gc = Vi

Ces sujets réalisent très vite, en l'essayant, qu'il y a conflit avec la situation unidimensionnelle où l'on donne un coup de même grandeur que la vitesse en direction opposée à celle du mouvement. Ceci leur permet par ailleurs d'inférer qu'on ne pourra pas davantage modifier l'orientation initiale de plus de 90 degrés, tant que l'on maintient la grandeur du coup égale à la vitesse initiale.

Voici quelques exemples :

MAR., Sec. V, Grpe 2 (séance 2) - La balle ayant une Oi de 90, on lui demande si elle pourrait l'envoyer à 180 degrés, avec Gc = Vi. - *Il faudrait que ce soit une orientation de 270 avec la même vitesse. Je vais essayer... je ne comprends pas... Ah bien c'est le contraire, c'est normal qu'elle s'arrête.* - Elle explique alors qu'elle pourrait l'envoyer à 180 degrés en deux coups successifs, c'est-à-dire en l'envoyant d'abord à 135 degrés puis ensuite à 180 degrés.

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 5) - Serais-tu capable, avec un coup de même grandeur que ta vitesse, de l'envoyer à 135 (Oi est de 45 degrés) ? - *... ça me donne 225, donc ça ne marchera sûrement pas parce qu'il va s'arrêter puisque Gc = Vi. Il faudrait que je donne une autre grandeur...* - Est-ce que tu pourrais l'envoyer plus loin que 135, avec Gc = Vi (donc à plus de 90 degrés de Oi) ? - *Admettons que je veux arriver à 185, mon vecteur final. De 45 (Oi) à 185 (Of) il y a 140 degrés d'écart... ça me donnerait 280 + 225. D'après moi, ça ne marchera pas, je ne peux avoir aucune valeur là* (soit entre 135 et 225). *Par contre, je pense qu'à 225 on peut l'envoyer... non je ne peux pas l'envoyer non plus. Si je veux que mon vecteur résultant soit de 225, il faut que je fasse le double de l'écart. Donc il y a toute une partie où ça ne marchera pas.*

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 2) - Ayant constaté que ce n'est pas possible, elle a l'idée ingénieuse de donner au coup d'orientation presqu'opposée, mais pas complètement, à celle du mouvement et elle prévoit très justement qu'elle devrait obtenir une orientation de presque 90 degrés, avec une vitesse très faible. - *Je vais donner une orientation proche de 180* (Oi étant à 0 degré). *Si je lui donne 179, ce qui n'est pas l'opposé, avec une grandeur de 10* (donc égale à Vi qui est aussi de 10), *je pense que je*

vais me retrouver proche de 90 avec une très petite vitesse... C'est ça... - (Vf est de 0,17 et Oc de 90). On lui précise que même si l'ordinateur indique une Of de 90 degrés, en réalité c'est simplement très très proche de 90. Elle explique alors : *C'est pratiquement impossible en théorie parce que si je veux donner exactement le milieu, une orientation de 90* (Oi = 0 et Oc = 180), *il faut que je donne 180 puis si je donne à 180, ça va s'annuler parce que ma grandeur est égale à ma vitesse.*

Ces situations sont donc généralement bien comprises par les sujets. Leur exploration permet cependant de prendre davantage conscience que l'on ne peut modifier l'orientation initiale de plus de 90 degrés, de part et d'autre du mouvement initial, lorsqu'on donne un coup de même grandeur que la vitesse. La plupart comprennent que, pour obtenir une orientation finale à plus de 90 degrés du mouvement initial, il faut donner un coup de grandeur supérieure à la vitesse.

b) Situations dans lesquelles l'écart entre Oi et Oc est supérieur à 180 degrés

Ces situations s'avèrent relativement faciles à comprendre pour trois sujets de secondaire V. Cependant, deux étudiantes (HEL. et LUC.) éprouvent un peu plus de difficultés que les autres à prévoir les changements d'orientation dans ces situations. Elles ont tendance à raisonner comme les sujets de secondaire III, c'est-à-dire à mesurer l'écart entre Oi et Oc et non l'inverse, ce qui conduit à des anticipations erronées.

Voici quelques exemples :

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 3) - En voulant généraliser à d'autres situations la "stratégie de la moyenne", elle choisit elle-même un coup de grandeur 20, donc égal à la vitesse initiale, et d'orientation 235, soit 10 degrés de plus que l'orientation opposée à celle du mouvement. - *Je dirais que ça ferait.. peut-être pas exactement le milieu mais pas loin... puis si on fait de l'addition de vecteurs, ça va être... 100 et quelques degrés, peut-être 110...*" - (Ayant donné le coup, elle constate que l'orientation finale est de 320 et se demande où elle s'est trompée). - *... j'ai donné mon coup à 235, de la même grandeur, ça ne marche pas...* - Est-ce que tu comprends pourquoi la balle va à 320 degrés.... quand tu dessines tes vecteurs, ça marche ? - *Oui, j'essaie de trouver une relation mathématique. J'avais 45 au départ, j'ai rajouté 235, ça veut dire une différence de 190 entre les deux..., la multiplication que j'avais trouvée tout à l'heure* (soit le calcul de la moyenne ou du milieu de l'écart), *ça ne marche pas. J'avais dit si on prend la moitié de l'écart et qu'on le rajoute à la valeur de l'orientation initiale, ça me donne la valeur*

de l'orientation finale puis ce n'est pas ça. Ce serait supposé me donner 125 (elle fait ici une erreur de calcul, puisque cela devrait donner 140, soit 45 plus la moitié de l'écart qui est de 190) *puis j'ai 320...* etc. - Est-ce que tu trouves une explication au fait que ça ne marche pas ? - *Peut-être que si on a des angles qui sont 90 ou moins... non même pas, 180... Je dirais que si on part de 0 et qu'on va jusqu'à 180, ça fonctionnerait.* - Elle essaie ensuite de vérifier son hypothèse.

HEL., Sec. V, Grpe 2 (séance 4 et 5) - On lui suggère d'essayer d'obtenir une orientation finale de 270 degrés, l'orientation initiale étant de 45. Or cette situation s'avère problématique, parce qu'il lui est difficile de comprendre comment elle doit mesurer l'écart pour déterminer quelle orientation donner à son coup. Elle essaie ensuite de prévoir l'effet d'un coup de 270 degrés sur un mouvement initial à 45. Mais elle néglige, dans sa mesure de l'écart, le fait que l'orientation initiale n'est pas de 0 degré, mais bien de 45 degrés, ce qui donne lieu à des prévisions incorrectes. Elle essaie ensuite autre chose. - *Mettons que je voudrais qu'elle aille à 180 puis elle est à 45... ça ne marche pas. Mettons qu'on donne à 315, et 45 est par là, on voudrait qu'elle aille entre les deux mais par en bas.* - Tu veux l'envoyer à 180 ? - *Disons qu'elle va à 45 puis je veux qu'elle aille à 180, puis je lui donne le coup à 315, elle va aller à 0* (soit à l'opposé de 180) *mais si je voulais qu'elle aille par en bas... je peux peut être juste m'organiser pour que ce soit par en haut quand c'est la même grandeur!* - Cette observation l'incite, elle aussi, à effectuer de nouvelles manipulations.

Ainsi, sauf pour deux sujets, LUC. (Grpe 1) et HEL. (Grpe 2), qui ont un peu plus de difficultés à prévoir l'orientation finale lorsqu'on donne un coup à plus de 180 degrés du mouvement initial, l'exploration des changements d'orientation s'avère très rapide puisqu'elle n'excède pas la séance 2. Par ailleurs, tous les sujets parviennent à évoquer ou à reconstituer les principales relations en jeu dans le schème de la moyenne, bien que l'utilisation de ces relations pose encore des problèmes à un sujet (HEL.) dans les situations où, l'orientation initiale étant différente de 0 degré, on donne le coup à plus de 180 degrés du mouvement initial.

Résumé

L'exploration des changements d'orientation, avec le système des coups, amène les étudiantes de secondaire III à différencier les situations bidimensionnelles des situations unidimensionnelles, c'est-à-dire à tenir compte du mouvement initial dans l'anticipation des résultats du coup. La compréhension qualitative des relations en jeu

entre les caractéristiques du coup et celles du mouvement initial s'avère très bonne pour au moins 4 sujets sur 5 qui parviennent à utiliser convenablement le raisonnement basé sur la "moyenne" pour anticiper ou expliquer les résultats du coup sur le changement d'orientation.

Cette exploration permet aux étudiantes de secondaire V, qui ont spontanément recours à la notion de vecteurs (4 sur 5), de raffiner leur représentation vectorielle des changements d'orientation, puisqu'elles différencient mieux les situations les plus simples, dans lesquelles on peut prévoir l'orientation finale avec exactitude, de celles dans lesquelles les anticipations demeurent purement qualitatives, la grandeur du coup étant différente de la vitesse initiale. Certaines situations (écart entre Oc et Oi supérieur à 180 degrés) s'avèrent encore quelque peu problématiques pour une seule étudiante de secondaire V qui néglige de tenir compte, dans son calcul de l'écart, du fait que l'orientation initiale n'est pas toujours de 0 degré.

B. Exploration du système des flèches

L'observation des données nous permet d'identifier, dans chacun des deux groupes, ce qui a été facilement compris ou découvert par les sujets, de même que les problèmes ou situations qui ont pu leur poser des difficultés.

7.1.3 Sujets de secondaire III

a) Effet de la combinaison d'un nombre égal ou inégal de coups horizontaux et verticaux

Les étudiantes constatent assez facilement qu'en donnant deux coups symétriques, la balle va "dans le milieu", et elles n'ont pas de difficulté à reconstituer les 4 orientations clés à mi-chemin des deux axes, soit 45, 135, 225 et 315 degrés, en combinant un même nombre de coups horizontaux et verticaux. La plupart parviennent même à anticiper correctement que l'orientation de la balle va se rapprocher de celles des deux orientations dans laquelle on aura donné le plus grand nombre de coups. Elles comprennent également, parfois après quelques tâtonnements ou hésitations, que l'on ne

peut obtenir de mouvement complètement horizontal ou complètement vertical lorsque l'on combine des coups orthogonaux, même si l'écart entre le nombre de coups horizontaux et verticaux est très grand.

Voici quelques exemples d'explications que donnent les sujets :

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 3) - Elle explique le fait que la balle se situe, ou non, à mi-chemin des deux axes, en fonction de l'égalité ou de l'inégalité de la grandeur du coup et de la vitesse initiale, comme dans le système précédent (coups). - *Elle va au milieu du 90 et du 0, ça fait 45... c'est parce que la vitesse était pareille à la grandeur du coup.* - Si tu donnes d'autres coups vers la droite, qu'est-ce qui va se passer ? - *Elle va aller un peu moins qu'au milieu, entre le 45 et le 90, parce que la vitesse est de 14.14 et la grandeur du coup de 10. Ça dépasse, alors elle va rester plus vers l'ancien mouvement. Je peux essayer... ça fait 63... c'est plus proche du 45 que du 90.*

CAM., Sec. III, Grpe 2 (séance 3) - *Si je donne plus de coups vers la gauche, elle va aller plus vers le 270, et si j'en donne plus vers le bas, elle va aller plus vers le 180.*

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 3) - Après avoir donné un coup vers le haut, elle en donne plusieurs vers la droite. - *Elle va plus vite, mais elle ne va pas complètement horizontalement... je pense que pour qu'elle aille complètement horizontalement, il faudrait que ma flèche vers le haut* (celle qui indique la somme des coups verticaux) *soit à 0.* - Pourquoi tu penses cela ? - *... c'est parce que s'il y a dix, ça veut dire qu'elle a quand même une petite orientation vers le haut, alors elle ne peut pas aller complètement horizontalement.*

b) Modification de la vitesse avec conservation de l'orientation

Lorsqu'on donne un même nombre de coups horizontaux et verticaux, les sujets n'ont pas de difficulté à comprendre comment modifier la vitesse tout en conservant une orientation à mi-chemin des deux axes. Toutefois, dans les cas où le nombre de coups horizontaux diffère du nombre de coups verticaux, ils raisonnent spontanément de façon additive et non multiplicative, c'est-à-dire qu'ils conservent la "différence" et non le "rapport". Par exemple, ils anticipent que 4 coups horizontaux et 5 coups verticaux vont donner une plus grande vitesse, mais la même orientation, que 3 coups horizontaux et 4 coups verticaux. Ce n'est souvent qu'après quelques tâtonnements qu'ils découvrent, pour la plupart, que la conservation de l'orientation est reliée à la conservation du rapport

entre le nombre de coups horizontaux et verticaux (exemple : 2 coups Hor. pour 4 coups Ver. équivaient à 3 coups Hor. pour 6 coups Ver.).

Voici un exemple illustrant la découverte de cette relation :

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 3) - La balle a une orientation de 45. Si tu voulais augmenter ou diminuer la vitesse, tout en gardant une orientation de 45, qu'est-ce que tu ferais ? - *Si je mets 20 ici, je pourrais mettre 20 ici aussi, elle va aller plus lentement mais elle est encore à 45. Si je veux la diminuer encore, c'est la même chose. Il faut que je descende aux deux endroits pour qu'elle reste à 45 degrés...* - Admettons qu'elle va un peu plus vers la droite (elle donne un coup de plus vers l'horizontale), serais-tu encore capable de changer la vitesse en gardant la même orientation ? - *Oui, je pourrais donner un coup de plus à chacun... ah non, son orientation a changé...* - Comprends-tu pourquoi ? - *Non, pas vraiment parce que je donne le même nombre de coups à droite et en haut, alors je me dis que ça devrait rester pareil.* - Tout à l'heure tu avais donné un coup en haut et 2 à droite... - *O.K... comme c'était 20 à droite et 10 en haut, c'était la moitié, alors il faudrait que je fasse le même rapport.* - Donc elle dépend de quoi l'orientation ? - *En fonction de la différence qu'il y a entre les coups qu'on donne... si j'avais mis 20 et 10, la balle aurait été plus lentement, mais ça aurait été la même orientation que 60 et 30. Le rapport entre les deux chiffres, il faut qu'il soit le même pour que l'orientation reste pareille.*

c) Modification de l'orientation avec conservation de la vitesse

On retrouve le même genre de difficultés lorsqu'on demande aux sujets d'essayer de modifier l'orientation tout en conservant une même vitesse. Ils constatent, sans trop de difficulté, qu'on peut obtenir des mouvements de même vitesse, mais d'orientations différentes, en combinant un coup en haut et un coup à droite ou, encore, un coup en bas et un coup à gauche. Mais la majorité d'entre eux ne voient pas très bien qu'on peut également y parvenir, dans n'importe quelle situation, en inversant simplement les signes et/ou les valeurs associées au nombre de coups horizontaux et verticaux (par exemple : 2 coups Hor. pour 3 coups Ver. produisent la même vitesse que 3 coups Hor. pour 2 coups Ver., mais non la même orientation).

La manipulation de l'orientation du mouvement, dans ce système, à l'aide d'une combinaison de coups horizontaux et verticaux, ne pose donc pas de problème majeur aux sujets de secondaire III. Ceux-ci n'ont pas de difficulté à raisonner en termes d'une combinaison de mouvements (ou coups) horizontaux et verticaux. Toutefois, un

seul sujet (NAD., Grpe 2) fait le lien avec les changements d'orientation dans le système des coups puisqu'elle explique l'effet de la combinaison d'un nombre inégal de coups horizontaux et verticaux en relation avec les situations dans lesquelles la grandeur du coup diffère de la vitesse du mouvement (système des coups).

7.1.4 Sujets de secondaire V

a) Effets de la combinaison d'un nombre égal ou inégal de coups horizontaux et verticaux

Ces relations s'avèrent faciles à comprendre ou à reconstituer pour la majorité des sujets. Quelques uns font référence au "plan cartésien" ou encore aux "axes X et Y" pour rendre compte de la combinaison des coups horizontaux et verticaux.

En voici des exemples :

HEL., Sec. V, Grpe 2 (séance 3) - *Quand il y a une direction vers le haut et qu'il y en a toujours un horizontal, elle ne peut pas vraiment aller droite, elle va entre les deux, elle va entre l'horizontale et la verticale tant qu'on n'en enlève pas un des deux... C'est comme un plan cartésien. Quand c'est négatif ça va vers la gauche puis par en bas. Là, on a donné deux coups* (symétriques) *elle ne peut pas aller droite, c'est comme à 45 degrés mais entre 180 et 270.*

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 4) - *C'est un peu les axes X et Y. On peut avoir les deux positifs, les deux négatifs, un positif et l'autre négatif... C'est le système des axes qu'on connaît.* - Qu'est-ce qui va se passer si tu donnes plus de coups dans une direction que dans l'autre ? - *D'après moi, ça devrait rester dans le même quadrant... ça change la position mais ça reste dans le même quadrant. Je vais essayer... À chaque fois qu'on donne dans une direction* (i.e. combinaison d'un coup vers le haut et de plusieurs à droite) *l'orientation change de moins en moins puis finalement on va toujours rester dans le même quadrant. Quand on a des points à placer, que ce soit -1 ou -10, ça va rester dans le même quadrant.*

Deux étudiantes, cependant, rencontrent des difficultés que n'ont pas eues les sujets de secondaire III. Elles semblent négliger le fait que la grandeur du coup (qui a une valeur constante de 10) devient inférieure à la vitesse de la balle lorsqu'on combine

un coup horizontal avec un coup vertical (vitesse de 14.14) ou encore deux coups horizontaux, ou bien deux coups verticaux (vitesse de 20). Ces étudiantes sont pourtant capables de reconstituer les relations en jeu dans le système des coups.

L'une d'entre elles (LUC., Grpe 1) ne parvient pas, à l'intérieur de cette séance, à surmonter complètement cette difficulté. Si elle anticipe aisément que la balle va aller dans le milieu lorsqu'on combine un coup horizontal avec un coup vertical, elle différencie mal cette situation de celle dans lesquelles le nombre de coups horizontaux diffère du nombre de coups verticaux. Lorsqu'après avoir donné un coup vers le haut, elle en donne plusieurs vers la droite, elle ne voit pas pourquoi la balle n'atteindrait pas une orientation de 90 degrés, négligeant l'effet du coup initial vers le haut. Même avec la représentation graphique de la composition des vecteurs, à laquelle elle a spontanément recours, elle ne comprend pas que la seule façon d'obtenir un mouvement complètement horizontal serait de donner un coup vers le bas, soit à 180 degrés, ce qui éliminerait l'effet du coup initial vers le haut, soit à 0 degré.

Voici un exemple illustrant le type de raisonnement qu'elle fait, dans cette situation.

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 4) - On lui suggère de donner un coup vers le bas, soit à 180 degrés, ce qui a pour effet d'éliminer l'effet du coup initial vers le haut. - *Je lui ai donné un vecteur vers le bas, à 180 degrés, et elle va à 90 degrés... ça me dépasse...! Ce que je ne trouve pas évident c'est que le petit vecteur que j'avais au début* (soit le coup initial de grandeur 10 à 0 degré), *étant donné que j'en ai additionné d'autres* (soit plusieurs coups successifs à 90 degrés), *il me reste juste mon vecteur de 89,52* (orientation de la balle avant qu'elle ne donne un coup à 180 degrés). *C'est mon vecteur final et en fait, j'ai oublié l'autre.* - Elle a donc de la difficulté à voir, dans son vecteur de 89,52, la combinaison d'un coup vertical vers le haut avec plusieurs coups horizontal vers la droite.

Une autre étudiante (CAR., Grpe 1) rencontre un problème tout à fait analogue, relié à la combinaison d'un coup vertical avec plusieurs coups horizontaux, mais elle parvient plus facilement à surmonter cette difficulté et à différencier, à travers ses manipulations, l'effet de la combinaison d'un nombre égal ou inégal de coups horizontaux et verticaux.

Voici un exemple.

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 4) - *Ma balle a une orientation de 26. Si je lui donne un coup à 180 degrés, elle va aller entre les deux... il faudrait que je calcule exactement. Ce ne sera pas dans le milieu. Je vais avoir trois forces. J'ai déjà une force vers le haut de 20. Je lui donne une force de 10 vers la droite et je lui rajoute une force de 10 vers le bas... Ah c'est intéressant, ça donne 45... J'ai trois forces qui agissent sur ma balle... j'en avais déjà une au début puis je lui en rajoute une troisième. Les deux premières ont agi l'une sur l'autre en premier puis j'en fais intervenir une troisième... ce qui m'épate, c'est l'orientation de 45! Je lui ai pourtant donné un coup vers le bas!...* - Elle se propose ensuite de donner un coup vers la gauche, sans toutefois anticiper le résultat, puis elle constate : *Je ne pensais pas arriver à 0 juste... Dans le fond, je fais juste annuler les forces que j'ai faites. J'avais un mouvement de 10 vers la droite, j'ai donné 10 vers la gauche, ils s'annulent, donc il revient à 0 degré...*

Les difficultés, qu'éprouvent ces deux étudiantes à rendre compte des résultats de la combinaison d'un nombre inégal de coups horizontaux et verticaux, ne semblent pas tant liées à la complexité des relations à établir, dans ce système, qu'aux représentations qu'elles font intervenir. Ainsi, par exemple, CAR. essaie de se représenter simultanément l'effet de trois coups successifs, au lieu de simplement considérer l'action d'un coup d'une certaine grandeur et orientation sur un mouvement d'une certaine vitesse et orientation. Quant à LUC., elle a manifestement du mal à relier le mouvement de la balle à une combinaison particulière (proportion) de coups horizontaux et verticaux.

b) <u>Modification de la vitesse tout en conservant la même orientation</u>

Certains sujets commencent par raisonner de façon additive, comme les sujets de secondaire III, avant de réaliser que l'orientation du mouvement dépend, non de la différence, mais de la proportion des coups horizontaux et verticaux. Tous les sujets, sauf LUC. qui bloque pendant toute la séance sur le même problème, sont donc capables d'expliquer comment on peut obtenir différentes vitesses, pour une même orientation, en maintenant constant le rapport de coups horizontaux et verticaux.

Voici quelques exemples d'explications que donnent les sujets :

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 4) - *Je garde le même rapport. Quand je double mes deux vitesses* (i.e. coups orthogonaux), *je double ma vitesse résultante... Il faut toujours que je double ou que je triple mes deux composantes, autrement, il n'y aura plus le même rapport entre mes deux angles.*

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 4) - *Supposons que je lui donne trois coups vers le bas et un vers la gauche, je vais arriver avec une certaine orientation et si je veux la garder et que je veux augmenter ma vitesse, il faut toujours que je fasse les mêmes proportions.*

c) Modification de l'orientation tout en conservant une même vitesse

Les sujets de secondaire V ont, en général, moins de difficultés que ceux de secondaire III à comprendre comment on peut obtenir une même vitesse, mais plusieurs orientations différentes, en combinant d'une certaine manière les coups horizontaux et verticaux. La plupart d'entre eux identifient 4 possibilités en fonction des 4 quadrants. Mais certains, comme CHA. (Sec.V, Grpe 1), sont encore plus précis et parviennent à dénombrer exactement combien d'orientations différentes on peut obtenir pour une même vitesse.

Voici un exemple illustrant l'identification de ces différentes possibilités :

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 4) - *Il faut changer les signes seulement... Si je veux changer seulement l'orientation... je change simplement les signes et on revient à la vitesse qu'on avait.* - On lui demande combien d'orientations différentes elle pourrait obtenir pour une même vitesse, avec un nombre inégal de coups horizontaux et verticaux (exemple : Oi de 22.36) - *Je dirais qu'il y en a 4. C'est avec les signes, mais c'est avec les valeurs aussi... Il faut que je garde les mêmes composantes dans le sens qu'il faut que j'aie une force de 20 et une force de 10, en valeur absolue, parce que ce sont les composantes de ma force... Il y aurait 4 possibilités en fonction des quadrants et une autre façon serait d'inverser mes valeurs...* - On lui suggère que ça pourrait donner non pas 4 mais 8 possibilités. - *Il y en aurait 8 parce qu'il y aurait les cas où j'ai + +, - -, + -, - +. Mais si j'inverse, que je mets mon 10 vers le haut et mon 20 vers la droite, c'est les mêmes cas. En fait l'important c'est de garder mes valeurs absolues, le 10 et le 20...*

Résumé

L'exploration de ce système s'avère donc relativement aisée avec la majorité des sujets, sauf avec une étudiante de secondaire V (LUC.). La reconstitution des différentes orientations que l'on peut obtenir pour une même vitesse est cependant un peu plus difficile, en particulier pour les sujets de secondaire III. Si la plupart des étudiantes semblent assez bien maîtriser les changements d'orientation, dans ce système, il est cependant difficile d'évaluer dans quelle mesure cette exploration a pu jouer ou non

un rôle facilitateur à l'égard de la compréhension des changements d'orientation dans le système des coups. En effet, les sujets établissent très peu de liens explicites entre ces deux systèmes. De plus, le rythme d'exploration pouvant différer d'un sujet à l'autre, ceux-ci ne sont pas tous rendus au même point, dans l'exploration du système des coups, lorsque débute l'exploration du système des flèches, soit à la séance 3, soit à la séance 4.

Les données recueillies, relativement à l'exploration du système des flèches, nous amènent tout au plus à constater comment les sujets se comportent face aux problèmes ou situations qui leur sont proposées dans ce système, mais elles ne nous permettent pas vraiment d'évaluer l'influence de cette exploration sur la compréhension des changements d'orientation dans le système des coups et réciproquement. À cet égard, il y aurait sans doute lieu de modifier quelque peu le scénario d'intervention de manière à inciter les sujets à établir des comparaisons explicites entre les deux systèmes, c'est-à-dire à essayer d'expliquer en quoi ces systèmes diffèrent l'un de l'autre et quelles sont les relations que l'on peut établir entre eux. On pourrait également envisager la possibilité d'introduire le système des flèches, soit avant de commencer l'exploration des changements d'orientation avec le système des coups ou, encore, après en avoir terminé l'exploration.

7.2 Étapes et processus d'équilibration en jeu dans la construction du schème de la moyenne

Nous analyserons les étapes et les processus en jeu dans la construction du schème de la moyenne uniquement en relation avec le système des coups, puisque ce dernier offre des possibilités d'actions beaucoup plus grandes que le système des flèches et qu'il fait l'objet d'une exploration plus approfondie. On peut envisager la construction progressive de ce schème sous l'angle de l'élaboration d'un raisonnement permettant d'apporter une solution au problème qui consiste à trouver comment prévoir approximativement l'orientation finale lorsque l'orientation du coup diffère de celle du mouvement initial. La construction de ce schème, tout comme celle du schème unidimensionnel, fait appel à plusieurs éléments de connaissance que les sujets possèdent déjà, mais qui doivent être évoqués et utilisés de façon particulière en relation avec certaines situations et/ou problèmes à propos de ces situations. Les sujets ne sont pas tous

au même niveau lorsqu'ils abordent l'exploration des changements d'orientation dans les situations bidimensionnelles. Mais quel que soit leur niveau de compétence initiale, l'acquisition de connaissances nouvelles va s'appuyer sur les connaissances déjà acquises.

7.2.1 Principales étapes de construction du schème

L'observation de la démarche des sujets nous amène à distinguer essentiellement trois grandes étapes dans la construction progressive du schème de la moyenne.

1ère étape : elle correspond à la capacité de se représenter l'orientation finale en termes de moyenne de l'orientation initiale et de celle du coup ou de milieu de l'écart formé par ces deux orientations. Elle suppose la capacité de tenir compte du mouvement initial et de relier l'orientation finale à la fois à l'orientation initiale et à celle du coup. Mais à cette étape, la moyenne ne constitue pas encore un "référent stable", faute de différenciation explicite entre les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale et ceux où elle est différente.

2ème étape : elle correspond à la différenciation et à la mise en relation du rôle de la grandeur avec celui de l'orientation. Le sujet découvre que la moyenne est reliée à l'égalité de Gc et de Vi et il parvient à expliquer les situations dans lesquelles la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale en référence à la moyenne. Autrement dit, il peut prévoir qu'un plus petit coup ayant moins d'effet, l'orientation finale va se situer en-deçà du milieu. Et, inversement, un plus grand coup ayant plus d'effet, l'orientation finale va se situer au-delà du milieu.

3ème étape : elle correspond à la découverte des "limites" à l'intérieur desquelles on peut modifier l'orientation initiale lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale. Cette découverte repose sur la mise en relation de la "moyenne" (i.e. relation entre Oi et Oc quand Oc est différente de Oi) et de l'"opposé" (i.e. relation entre Oi et Oc quand Oc = Oi + 180). Le sujet comprend pourquoi l'on ne peut modifier l'orientation initiale de 90 degrés ou plus, quand la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, et il parvient à évaluer correctement l'orientation finale lorsque l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup est supérieur à 180 degrés, ce qui suppose la compréhension de la "symétrie de l'écart".

7.2.2 Processus de passage d'une étape à la suivante

L'analyse des processus (déséquilibres, rééquilibrations) intervenant dans le passage d'une étape à la suivante nous permettra de comprendre comment les divers éléments de connaissance pertinents au schème sont peu à peu sélectionnés, différenciés et reliés les uns aux autres à partir de la confrontation entre les connaissances évoquées par le sujet et des situations particulières.

1/ Mise en relation des observables appropriés

Chez les sujets de secondaire III, qui ne différencient pas encore les situations bidimensionnelles des situations unidimensionnelles, le schème unidimensionnel va servir de point de départ à la compréhension des changements d'orientation bidimensionnels. Cette compréhension est en effet solidaire de la différenciation progressive de l'unidimensionnel et du bidimensionnel. Cette différenciation va consister à délimiter progressivement le champ d'application du schème unidimensionnel, c'est-à-dire à distinguer les situations dans lesquelles les relations unidimensionnelles s'appliquent de celles dans lesquelles elles n'interviennent pas. Le schème unidimensionnel induit chez le sujet de nouvelles anticipations quant aux effets du coup sur le mouvement de la balle. Mais en lui donnant accès à des observations qui n'étaient pas accessibles auparavant, il le rend également vulnérable à de nouveaux déséquilibres. En effet, alors que dans les situations unidimensionnelles l'orientation finale correspond, soit à l'orientation initiale, soit à celle du coup, ce n'est plus le cas dans les situations bidimensionnelles où elle ne correspond ni à l'une ni à l'autre, mais à une relation particulière (moyenne ou milieu de l'écart) entre ces deux orientations.

Une première source de déséquilibre est donc constituée par la confrontation entre anticipations unidimensionnelles et situations bidimensionnelles puisque le sujet ne dispose pas de représentation appropriée pour comprendre ou interpréter les résultats du coup sur le changement d'orientation. Il y a à la fois absence de différenciation et défaut de mise en relation des variables en jeu (i.e. grandeur et orientation du coup et vitesse et orientation du mouvement). Ces déséquilibres sont particulièrement caractéristiques des sujets de secondaire III dont les premières manipulations conduisent simplement à la formation d'observations disparates qu'ils ne parviennent pas à interpréter faute de pouvoir les relier entre elles. Le sujet remarque des données imprévues, mais sans être capable de les utiliser. Par exemple, il peut constater que l'orientation finale ne

correspond pas à l'orientation du coup et que, même si l'on donne un très grand nombre de coups, l'orientation finale ne fait que se rapprocher de celle du coup sans jamais l'atteindre, mais il ne sait pas pourquoi. Aussi, l'observation des résultats conduit-elle tout au plus à différencier globalement les situations dans lesquelles le schème unidimensionnel s'applique de celles dans lesquelles il ne s'applique pas.

L'un des principaux obstacles à l'établissement de relations appropriées réside dans l'interdépendance des variables en jeu. En effet, puisque les changements d'orientation dépendent à la fois de l'orientation du coup par rapport à celle du mouvement et de la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale, il s'avère extrêmement difficile d'abstraire les relations appropriées si l'on donne des coups qui ont à la fois une grandeur et une orientation différentes de la vitesse et de l'orientation initiales du mouvement. La mise en relation des "observables" appropriés (soit Oc, Oi et Of) va donc s'effectuer au contact des situations dans lesquelles, la grandeur du coup étant égale à la vitesse initiale (variable grandeur "neutralisée"), il est possible de centrer exclusivement son attention sur la relation entre les orientations en jeu. Elle va consister à relier les résultats observés (changements d'orientation) aux actions effectuées (orientation du coup), sur un mouvement d'orientation donnée, et à les interpréter à la lumière des connaissances préalables. C'est ce que font les sujets de secondaire III lorsqu'ils constatent que "la balle va dans le milieu" et qu'ils relient ce milieu à une "moyenne" de l'orientation initiale et de celle du coup.

Cette mise en relation des observables, qui consiste à les insérer dans un système de relations (moyenne ou milieu de l'écart), engendre la construction d'une nouvelle procédure permettant de prévoir ou de calculer l'orientation finale, dans plusieurs autres situations, à partir des valeurs associées à l'orientation initiale et à celle du coup. Ce processus d'abstraction peut s'avérer plus ou moins facile et il arrive parfois que le sujet conserve un peu trop de détails de la situation particulière ayant servi de support à l'évocation de cette relation (exemple : quand l'orientation initiale est de 0 degré), ce qui nuit alors à sa généralisation (MAP., Sec. III, Grpe 1). Par ailleurs, dans la mesure où il n'est pas nécessaire d'avoir exploré toutes les situations possibles à l'intérieur du micromonde pour découvrir le schème de la moyenne, ce n'est pas parce que le sujet parvient à construire une représentation ou une procédure appropriée qu'il connaît d'emblée l'extension de son champ d'application. C'est pourquoi la "mise en relation des observables appropriés" ne constitue qu'une <u>première étape</u> de la compréhension des changements d'orientation. Celle-ci devra s'effectuer progressivement en surmontant les

déséquilibres engendrés par l'utilisation d'un schème ou d'une procédure correcte, mais appliqués à des situations légèrement plus complexes.

2/ Différenciation du schème à travers son application à des situations variées

Lorsque les sujets parviennent à établir des relations appropriées, leur permettant de prévoir correctement l'orientation finale dans plusieurs cas, ils ont tendance à généraliser ces relations à un grand nombre de situations. Une autre source de déséquilibre est donc liée au fait que le sujet tend à donner à son schème une trop grande extension. La perturbation est alors constituée par la présence d'éléments d'information "nouveaux", dont il importe de tenir compte, mais que le sujet néglige. Cette tendance à la généralisation indue, dont on trouve plusieurs exemples tant chez les sujets de secondaire V que chez les sujets de secondaire III, n'est que le reflet du processus d'apprentissage naturel qui consiste à essayer de comprendre le nouveau à la lumière de ce qui est connu. Elle va conduire à la différenciation progressive du schème à travers son application à des situations variées.

a) Identification du champ d'application du schème

À partir du moment où les sujets de secondaire III découvrent que la "balle va dans le milieu", ils disposent d'un outil de compréhension ou d'évaluation leur permettant de prévoir ou d'expliquer les changements d'orientation dans plusieurs situations. En effet, une fois qu'elle a été abstraite de son contexte de formation et appliquée avec succès à quelques situations, la notion de moyenne ou de milieu de l'écart constitue un nouvel élément de connaissance qui va servir à explorer d'autres situations, à comprendre ce qui est relativement nouveau à la lumière de ce qui est déjà connu. L'application du schème de la moyenne aux situations dans lesquelles la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale est source de déséquilibres qui vont conduire à des différenciations nouvelles. En constatant que l'orientation finale est différente de celle qu'ils anticipaient, les sujets sont amenés à distinguer l'effet du coup sur le changement d'orientation en fonction de sa grandeur. Cette différenciation est rendue possible par la confrontation à des situations qui, tout en comportant des caractéristiques "nouvelles", ne sont pas trop éloignées du schème. Elle consiste à introduire dans le schème des modifications permettant de tenir compte d'éléments d'information antérieurement négligés (en l'occurrence, la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale).

Cette confrontation à des situations nouvelles et antérieurement indifférenciées conduit, non pas à rejeter le schème, mais simplement à le "relativiser", c'est-à-dire

à délimiter son champ d'application, ou encore, à définir ses "conditions d'application" (*il faut que Gc soit égale à Vi pour que Of soit dans le "milieu"*). Par ailleurs, elle modifie son statut puisque la moyenne devient en quelque sorte le "référent" à partir duquel sont comprises les situations dans lesquelles la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale. Il n'y a donc pas "substitution" ni même "addition" d'un nouvel élément de connaissance, mais intégration d'une information nouvelle (la variable grandeur) à un schème déjà construit (moyenne).

On retrouve un processus de différenciation analogue chez deux sujets de secondaire V (MAR. et HEL., Grpe 2) qui ont spontanément recours à cette idée de "moyenne" ou de "milieu de l'écart" pour essayer de modifier l'orientation initiale d'une certaine valeur, mais sans différencier les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse de ceux où elle est différente. L'utilisation de ce schème, pour produire certains résultats, va engendrer des déséquilibres, sources d'ajustements conduisant à modifier plus ou moins le schème. Ces déséquilibres proviennent ici de ce que l'on pourrait appeller une "erreur de contrôle" (Côté, 1981), c'est-à-dire de l'utilisation d'une procédure correcte, mais appliquée à des situations auxquelles elle ne convient pas tout à fait. C'est en constatant que les résultats obtenus ne correspondent pas aux résultats anticipés ou recherchés que les sujets sont amenés à se demander ce qui explique cette divergence et comment modifier leur représentation initiale pour parvenir à rétablir l'équilibre.

Ce processus de différenciation peut prendre différentes formes selon la nature des connaissances évoquées et/ou utilisées par le sujet. Ainsi, ce dernier peut disposer d'une représentation adéquate, lui permettant d'effectuer des approximations qualitatives assez justes de l'orientation finale, sans toutefois distinguer les situations simples, dans lesquels on peut prévoir l'orientation finale avec exactitude, des situations plus complexes où les prévisions demeurent approximatives. C'est le cas d'une étudiante de secondaire V (LUC., Grpe 1) qui applique un même schème global d'addition graphique des vecteurs à toutes les situations, ce qui engendre quelques déséquilibres. Alors que dans le cas précédent, les sujets donnaient au schème de la moyenne une trop grande extension, dans le cas présent, il y a au contraire excès de différenciation de la moyenne, celle-ci n'étant pas reliée à tous les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse, mais seulement aux cas particuliers où l'orientation du coup est symétrique à celle du mouvement. Ces déséquilibres sont liés au fait que la "moyenne" ne constitue pas encore un "référent stable" permettant de comprendre les situations plus complexes à partir des plus simples. La rééquilibration va donc consister à généraliser cette relation à

tous les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse et à rendre cette représentation compatible avec la représentation en termes d'addition graphique des vecteurs.

Cette mise en relation de deux représentations différentes (moyenne et addition graphique) d'un même problème (i.e. changements d'orientation bidimensionnels) conduit à leur enrichissement mutuel puisqu'elle permet d'introduire une hiérarchie entre des situations antérieurement considérées comme équivalentes. Elle a pour effet de raffiner les représentations initiales du sujet puisqu'elle permet une "économie de moyens" dans la résolution de problème. Elle engendre en effet des modifications au niveau des connaissances de contrôle qui décident quelle procédure ou sous-procédure devra être utilisée pour une situation donnée.

b) Différenciation des modalités d'application du schème

Un autre exemple, illustrant cette tendance qu'ont les sujets à donner à leur schème une trop grande extension, est celui dans lequel l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup est "supérieur" à 180 degrés. L'application du schème de la moyenne à ces situations, présentant certaines caractéristiques qui les distinguent d'autres situations, est en effet source de déséquilibres chez plusieurs sujets. Ces déséquilibres sont liés, une fois de plus, au fait que le sujet néglige des éléments d'information pertinents, tels que le caractère symétrique de l'écart ou encore, l'équivalence entre 0 et 360 degrés. Ceci l'empêche de réaliser, avant de l'avoir essayé, qu'on ne peut avoir d'écart entre deux orientations qui soit supérieur à 180 degrés, d'où la nécessité de mesurer l'écart en sens inverse, c'est-à-dire en partant de l'orientation du coup et non pas de celle du mouvement initial. Pour parvenir à prévoir ou expliquer correctement les changements d'orientation, dans ces situations, le sujet devra intégrer à ses représentations initiales de nouveaux éléments d'information. Cette intégration va se refléter dans la différenciation des modalités d'application du schème puisqu'elle conduit, d'une part, à identifier d'autres façons de calculer la moyenne ou de mesurer l'écart et, d'autre part, à préciser quelles sont les conditions ou situations dans lesquelles il convient de le calculer d'une façon plutôt que d'une autre.

Les sujets peuvent rencontrer plus ou moins de difficultés à effectuer ces différenciations nouvelles, c'est-à-dire à utiliser correctement le schème de la moyenne dans les situations où l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup est supérieur à 180 degrés. Par exemple, la nécessité de tenir compte de l'équivalence entre 0 et 360 degrés et de faire intervenir, dans la mesure de l'écart, une opération supplémentaire

d'addition, lorsque l'orientation initiale diffère de 0 degré, peut constituer un obstacle de plus, source de déséquilibre, pour les sujets qui négligent plus ou moins ces éléments d'information. On en trouve un exemple avec une étudiante de secondaire V (HEL.) qui a de la difficulté à utiliser correctement le schème de la moyenne dans ces situations. Il peut également arriver que le sujet confonde les "conditions d'application" du schème avec ses modalités d'application. C'est le cas de LUC. qui a un peu de difficultés à différencier les situations dans lesquelles le schème de la moyenne ne s'applique pas parce que la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale, des situations dans lesquelles il ne s'applique pas directement parce que l'orientation du coup dépasse l'orientation opposée à celle du mouvement initial.

Ces divers exemples illustrent comment le sujet peut être amené à introduire des modifications variées au sein d'une représentation appropriée, mais encore trop globale, à travers l'utilisation qu'il en fait au contact de problèmes ou de situations variées. On voit ainsi comment un schème ou une représentation se consolident à travers leur exercice. L'intégration progressive, à ces représentations initiales, d'éléments d'informations nouveaux et initialement perturbateurs, va se traduire par l'introduction de variations à l'intérieur d'une structure réorganisée. C'est ainsi que la maîtrise progressive d'une procédure peut elle-même devenir une procédure. D'abord exécutée avec succès dans des cas spécifiques, elle devient peu à peu, à travers sa généralisation, un outil utilisable plus librement à l'intérieur d'un domaine d'application plus large. On retrouve là un processus décrit par Lawler (1985) et qui rejoint quelques-uns des mécanismes fondamentaux d'équilibration dont parle Piaget.

3/ Coordination de deux schèmes distincts à travers leur application simultanée à une même situation

Une autre étape du processus de construction et/ou de consolidation d'un schème repose sur la capacité de relier entre eux, à travers leur utilisation simultanée, des schèmes antérieurement dissociés, ce qui contribue à leur enrichissement mutuel. Cette mise en relation de deux représentations distinctes illustre l'un des processus d'équilibration, décrit par Piaget en termes de passage des *coordinations* d'un niveau donné à des *observables* de niveau supérieur. On peut en effet considérer comme de nouveaux "observables" les résultats des diverses "coordinations" ou mises en relation successivement effectuées par les sujets. Ainsi, par exemple, si l'on se place au niveau de la construction du schème unidimensionnel, la situation où "la balle s'arrête" relève de la mise en relation d'observables constitués par les caractéristiques du coup et par celles

du mouvement initial, dans les situations unidimensionnelles. De même, la constatation que "la balle va dans le milieu" constitue le résultat des coordinations d'observables effectuées au sein même du schème de la moyenne. Cependant, une fois ces schèmes construits, les produits de ces coordinations constituent eux-mêmes de nouveaux "observables" qui pourront se coordonner à leur tour. Or, certaines situations vont précisément servir de support à la coordination des schèmes entre eux à travers leur application simultanée à une même situation.

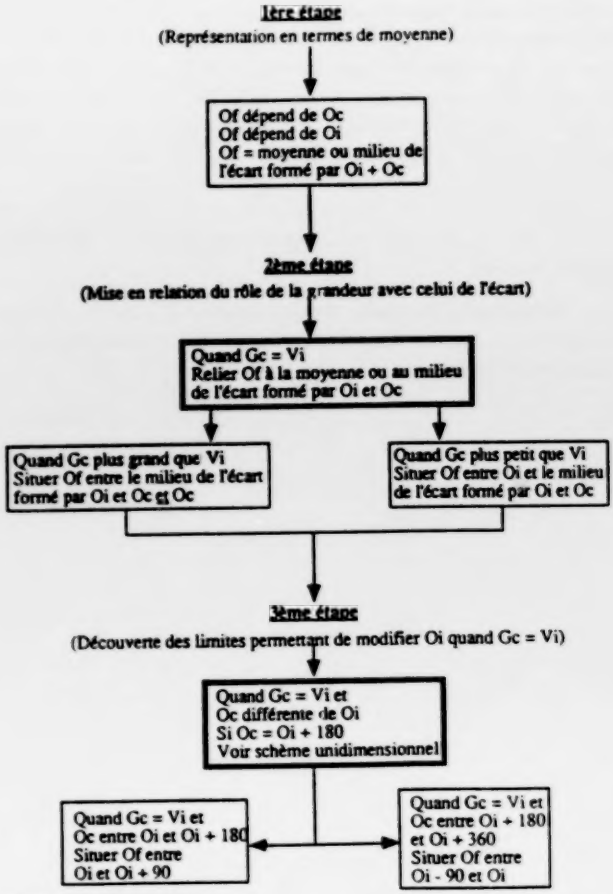
On en trouve un bel exemple lorsque le sujet cherche à modifier l'orientation initiale de 90 degrés, avec un coup de même grandeur que la vitesse, sans réaliser qu'il lui faudra alors donner le coup à 180 degrés du mouvement initial. Dans cette situation particulière, le sujet utilise le schème de la moyenne pour produire un certain résultat, c'est-à-dire déterminer quelle grandeur et quelle orientation donner au coup pour obtenir une orientation particulière. Mais il évoque le schème unidimensionnel pour rendre compte des résultats observés, ceux-ci ne correspondant pas aux résultats recherchés. La mise en relation des actions effectuées et de leurs résultats sur l'objet va engendrer des coordinations nouvelles, sources de modifications dans l'organisation préalable des connaissances. C'est ainsi que deux schèmes antérieurement dissociés, parce que s'appliquant à des situations différentes, vont se trouver en quelque sorte "relativisés" l'un par l'autre. Cette coordination nouvelle va permettre de mieux identifier les limites à l'intérieur desquelles on peut modifier l'orientation initiale, lorsqu'on donne un coup de même grandeur que la vitesse. Par ailleurs, la mise en relation de ce nouvel élément de connaissance (i.e. on ne peut modifier Oi de 90 degrés ou plus quand Gc = Vi), avec les éléments de connaissance impliqués dans la différenciation des modalités d'application du schème, va contribuer à enrichir la compréhension des situations dans lesquelles l'écart entre l'orientation du coup et celle du mouvement est supérieur à 180 degrés.

On retrouve dans l'idée de "moyenne", qui constitue le point de départ de la construction du schème, l'une des "primitives phénoménologiques" identifiées par diSessa (1988), celle de "balance dynamique". Cette intuition primitive, applicable à toutes sortes de contextes, exprime l'idée d'un conflit entre deux forces en opposition. Si elles sont égales, aucune ne l'emporte sur l'autre et si elles sont inégales, la plus forte des deux l'emporte. On peut voir, dans la construction progressive du schème de la moyenne, le résultat d'une élaboration de cette intuition initiale qui, en se développant, acquiert un statut davantage systématisé ou formalisé.

Ces divers processus, intervenant dans la construction du schème, ne se succèdent pas au hasard, mais présentent une certaine hiérarchie. En effet, on ne peut différencier un schème ou une représentation à travers son utilisation que dans la mesure où elle est construite et on ne peut la construire sans mettre en relation certains éléments d'information (ou observables) pertinents, permettant de prévoir ou d'interpréter au moins quelques situations. La succession de ces processus permet de mieux comprendre comment les connaissances préalables du sujet sont amenées à se transformer et à s'élaborer à travers leur utilisation. Les modifications engendrées ne sont jamais indépendantes des connaissances évoquées et des situations en rapport avec lesquelles elles sont utilisées. Elles vont prendre la forme d'une réorganisation, en un tout intégré (le schème), des éléments d'information successivement acquis aux différentes étapes de construction du schème.

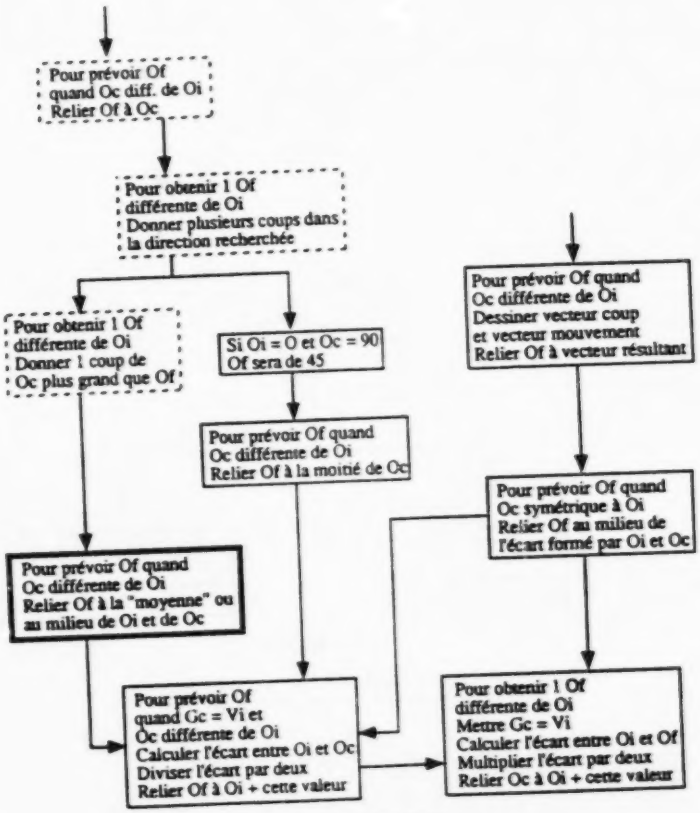
Les tableaux, présentés dans les pages qui suivent, résument les trois grandes étapes de construction du schème, de même que les principales stratégies intervenant à chacune de ces étapes.

Tableau 7 : Principales étapes de construction du schème de la moyenne



Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

Tableau 8 : Principales stratégies observées à la 1ère étape de construction du schème de la moyenne

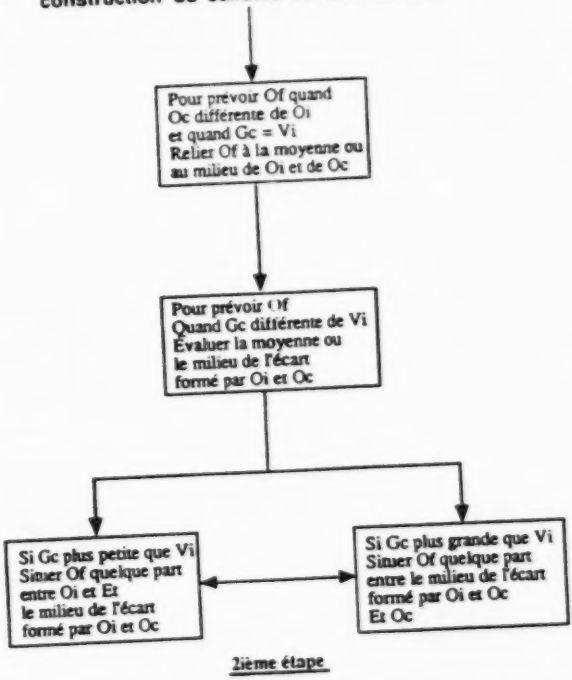


1ère étape

Stratégies conduisant à la découverte de la moyenne

Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

Tableau 9 : Principales stratégies observées à la 2ème étape de construction du schème de la moyenne

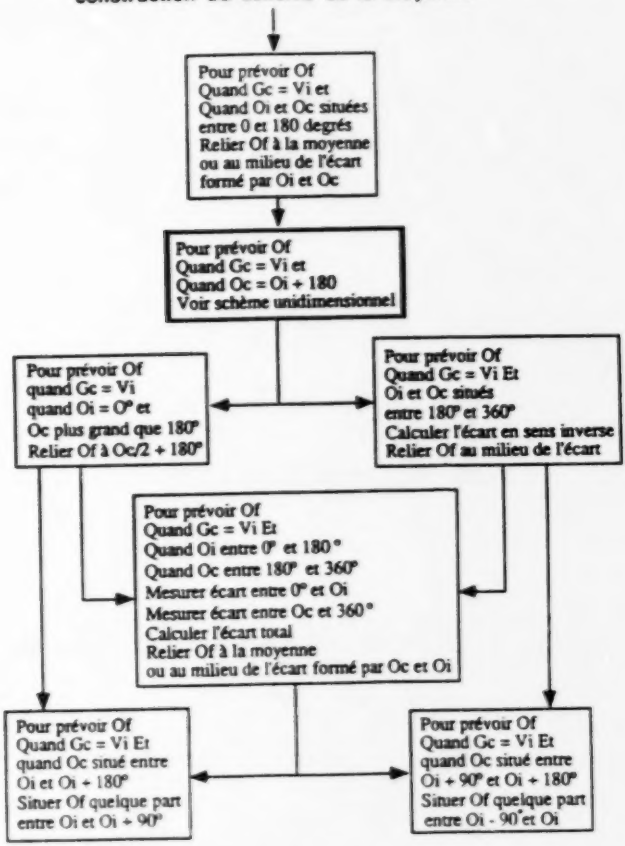


2ième étape

Stratégies conduisant à la différenciation de l'effet du coup en fonction de la grandeur

Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

Tableau 10 : Principales stratégies observées à la 3ème étape de construction du schème de la moyenne



3ème étape

Stratégies conduisant à la découverte des limites à l'intérieur desquelles modifier Oi quand Gc = Vi

Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

CHAPITRE 8

CONSTRUCTION DU SCHÈME DE L'ÉCART

8.1 Phase III : Exploration des changements de vitesse bidimensionnels

L'exploration des changements de vitesse dans les situations bidimensionnelles a pu être faite de façon systématique avec trois sujets de secondaire III qui ont achevé l'exploration des changements d'orientation au cours de la séance 4. Un seul sujet (MAP., Sec.III, Grpe 1) n'a pas eu le temps d'explorer les changements de vitesse et un autre (MAT., Sec.III, Grpe 1) n'a fait que commencer cette exploration au cours de la séance 5. Chez les sujets de secondaire V, une seule étudiante (HEL., Grpe 2) n'a pratiquement pas exploré les changements de vitesse, ayant mis plus de temps que les autres à explorer les changements d'orientation.

L'observation de la démarche des sujets nous permet de mettre en évidence la succession des hypothèses, stratégies, anticipations et observations, ayant conduit d'une représentation plutôt globale des changements de vitesse à une représentation qualitative beaucoup plus précise, basée sur la découverte de la conservation de la vitesse initiale en relation avec l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup.

8.1.1 Sujets de secondaire III

1/ Anticipations spontanées

Lorsqu'elles abordent l'exploration des changements de vitesse, les étudiantes de secondaire III comprennent la nécessité de tenir compte du mouvement initial dans l'anticipation des effets du coup et elles ont une représentation intuitive assez juste du lien entre l'orientation du coup et celle du mouvement initial. Quand on leur demande comment elles font pour savoir si la vitesse va augmenter ou diminuer, lorsque le coup est donné dans une orientation différente de celle du mouvement, elles raisonnent spontanément en termes d'écart plus ou moins grand par rapport à l'orientation initiale.

Voici quelques exemples caractéristiques de leurs représentations initiales.

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 4) - La balle a une vitesse de 20 et une orientation de 45 (situation de départ). - *... bien je pense que je pourrais savoir si elle va augmenter ou diminuer par rapport à l'orientation que je vais lui donner... Si je veux augmenter la vitesse, je ne suis pas obligée de donner une orientation de 45. Disons*

que je mets la grandeur à 20... l'orientation, je donnerais un coup à peu près par là... à 80. Je pense que la vitesse va augmenter. Peut-être que si j'avais donné un coup à 110, je ne sais pas si elle aurait augmenté...

MAT., Sec. III, Grpe 1 (séance 5) - *Plus en plus qu'on se rapproche de l'opposé, plus en plus qu'elle diminue. Plus en plus qu'on se rapproche du même chiffre qu'elle allait, plus en plus qu'elle augmente.*

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 5) - *Si je mets la grandeur à 20 puis je laisse l'orientation à 45, elle va doubler... puis, si je veux qu'elle diminue, je vais mettre le contraire de 45, 225, puis ça diminue de 20. C'est ça.* - Donc, quand c'est sur la même ligne que ton mouvement, soit dans la même direction, soit en direction opposée, c'est facile. Mais si on donne le coup dans une autre orientation, as-tu une idée de ce qui va se passer ? - *... si je l'envoyais à 135, on va dire entre les deux... je pense que ça augmenterait de 10 seulement parce que, quand c'était à 45, ça augmentait de la grandeur que j'avais mise et quand c'était à 225, ça diminuait de la grandeur que j'avais mise. À moins que ça ne change pas... je vais voir... Elle a augmenté de presque 10 parce que c'était entre les deux. Donc ça ne pouvait pas augmenter de 20...*

Ces étudiantes semblent comprendre, d'une part que l'on doit tenir compte du mouvement initial et, d'autre part, que l'augmentation de vitesse devrait être inférieure à la grandeur du coup lorsque l'orientation du coup diffère de celle du mouvement. Elles savent qu'un coup de même grandeur que la vitesse a pour effet de doubler celle-ci s'il est donné dans la même orientation que le mouvement et qu'il a pour effet d'arrêter le mouvement s'il est donné dans la direction opposée. L'évocation et la mise en relation de ces deux situations unidimensionnelles opposées induit l'idée selon laquelle la vitesse devrait augmenter si l'orientation du coup est suffisamment proche de celle du mouvement et qu'elle devrait diminuer si elle se rapproche davantage de l'orientation opposée à celle du mouvement. Elles font donc assez facilement l'hypothèse que les changements de vitesse doivent être reliés à l'écart plus ou moins grand entre l'orientation initiale et celle du coup. Mais leur représentation du rôle de l'écart demeure encore globale puisqu'elles ne font que différencier les cas extrêmes où l'orientation du coup est soit très proche ou au contraire très éloignée de celle du mouvement initial.

Une seule étudiante, MAP., Grpe 1, qui n'a d'ailleurs pas le temps d'explorer les changements de vitesse, ne semble avoir aucune idée du rôle de l'écart qui permet de prédire que la vitesse augmente dans certains cas et diminue dans d'autres cas, selon que l'orientation du coup se rapproche plus ou moins de celle du mouvement initial. Elle

sait simplement, pour l'avoir constaté, que la vitesse n'augmente pas d'une valeur égale à la grandeur du coup, lorsque l'orientation du coup diffère de celle du mouvement. Mais elle pense que la vitesse diminue seulement lorsque l'orientation du coup est opposée à celle du mouvement et qu'elle augmente plus ou moins dans toutes les autres situations.

2/ Découverte de la "limite" conservant au mouvement sa vitesse initiale quand Gc = Vi

La capacité de raisonner en termes d'écart plus ou moins grand par rapport à l'orientation initiale permet aux sujets d'envisager les changements de vitesse, augmentation ou diminution, dans un certain "continuum". Toutes ces étudiantes font en effet l'hypothèse, à un moment ou l'autre et sans même qu'on leur suggère, que si la vitesse augmente dans certains cas et diminue dans d'autres cas, il devrait bien y avoir une "limite" à partir de laquelle la vitesse cesse d'augmenter pour commencer à diminuer.

Deux sujets ont spontanément recours à la stratégie qui consiste à revenir à la situation de départ (soit un mouvement de vitesse de 20 et d'orientation 45) et à maintenir la grandeur du coup égale à la vitesse initiale pour ne modifier que l'orientation. Un autre sujet auquel on propose cette stratégie comprend l'utilité de "garder quelque chose de constant" et l'utilise correctement pour explorer l'effet de l'orientation du coup sur le changement de vitesse. On retrouve sensiblement la même démarche chez tous ces sujets.

Voici quelques exemples de conduites observées.

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 4) - Faisant l'hypothèse que c'est à plus de 90 degrés du mouvement initial que la vitesse commence à diminuer, elle essaie successivement un coup de même grandeur que la vitesse à un peu moins de 90 degrés du mouvement initial (85) puis à un peu plus de 90 degrés (95) et constate que la vitesse a encore augmenté. - *Je cherche dans quel champ ça pourrait augmenter ou diminuer... comme là, j'ai dépassé le 90* (i.e. écart entre Oi et Oc), *et ça quand même augmenté... Je vais mettre une orientation à 180 degrés* (soit à 135 degrés de Oi qui est de 45), *j'ai rajouté un champ de 45 puis ça n'a pas marché... elle a diminué.* - Elle essaie successivement un coup d'orientation 140 puis d'orientation 155 pour voir jusqu'où la vitesse augmente et constate que la vitesse augmente mais de très peu. Elle en conclut qu'elle se rapproche de là où la vitesse commence à diminuer. Elle essaie alors, par hasard, une Oc de 165, soit 120 degrés d'écart par rapport à Oi, et constate que la vitesse est demeurée la même. Elle essaie ensuite une Oc de 164 puis de 166 pour s'assurer que c'est

bien la limite. - *Je suppose qu'à 166, ça va diminuer. 165 ça devrait être la limite parce que je l'ai mis à 164 et ça augmenté de 0,3 puis je l'ai mis à 166 et ça diminué de 0,3.*

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 5) - Elle fait d'abord l'hypothèse que la vitesse augmente à partir de l'orientation initiale jusqu'à son opposé puis qu'elle diminue à partir de l'opposé jusqu'à l'orientation initiale (elle néglige donc le caractère symétrique de l'écart). Entre les deux, soit à 90 degrés du mouvement initial, elle suppose que la vitesse devrait augmenter d'une valeur égale à la moitié de la grandeur du coup. Après quelques essais, elle modifie ses anticipations et prévoit, comme les autres sujets, que la vitesse augmente dans un plan de 180 degrés, soit à 90 degrés ou moins de part et d'autre du mouvement initial et qu'elle diminue lorsque cet écart est supérieur à 90 degrés. Ceci lui permet de déterminer certaines valeurs d'orientation pour lesquelles la vitesse augmente ou diminue. - *Je vais essayer ici...* (i.e. entre 270 et 315). *Ici, ça augmente de 10, là ça diminue de 5 mais entre les deux je ne sais pas vraiment ce qui se passe, je vais l'essayer.* - Elle donne un coup de Oc = 300 et constate que la vitesse augmente encore. On lui demande ce qu'elle peut en conclure. - *Bien, elle est encore assez proche de 45. Je m'étais dit qu'à partir de 135* (i.e. écart de 90 degrés entre Oi qui est de 45 et Oc), *elle allait diminuer parce qu'elle était plus proche de 225 que de 45 mais elle a quand même augmenté. Alors je vais essayer un coup plus proche de 270... si je fais un coup à 290... elle augmente encore un peu...* - Elle essaie alors par hasard un coup de Oc = 285, soit à 120 degrés de Oi. - *Ah voilà! La vitesse n'a pas changé, elle est restée la même... Je me dis qu'il faudrait que je trouve l'autre côté c'est combien. Il faudrait que ce soit encore à 120 degrés... C'est ça, c'est à 120 degrés de l'autre côté que ça reste pareil. Donc c'est seulement entre 165 et 285 que la vitesse diminue. Le reste, ça augmente tout le temps.*

Ces étudiantes situent toutes spontanément la "limite" à 90 degrés du mouvement initial, sans nécessairement associer d'emblée cette limite à la conservation de la vitesse initiale. Elles commencent simplement par anticiper qu'un coup donné à plus de 90 degrés du mouvement initial devrait avoir pour effet de diminuer la vitesse. Ceci les incite à essayer successivement des coups à 90 degrés ou aux alentours de 90 degrés du mouvement initial.

En donnant des coups dans différentes orientations, elles commencent d'abord par identifier certaines valeurs d'orientation pour lesquelles la vitesse augmente et d'autres valeurs pour lesquelles la vitesse diminue. C'est au cours de ces manipulations qu'elles font l'hypothèse qu'il devrait y avoir une orientation ("limite") permettant de

conserver au mouvement sa vitesse initiale, c'est-à-dire *"un point où la vitesse reste pareille"*. C'est ainsi qu'elles découvrent, de façon purement empirique et par approximations successives, la limite de 120 degrés permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse.

Puis, ayant constaté antérieurement, dans d'autres situations, qu'un même écart de part et d'autre du mouvement initial produisait un même changement de vitesse, l'idée d'aller vérifier si cette limite est, elle aussi, symétrique, apparait alors spontanément. Cette découverte de deux "limites" symétriques, situées à 120 degrés de part et d'autre du mouvement initial, les amène alors à diviser l'ensemble des orientations possibles en trois "champs" de 120 degrés, seul le champ de 120 degrés formé par les 60 degrés de part et d'autre de l'orientation opposée à celle du mouvement, ayant pour effet de diminuer la vitesse.

3/ Différenciation de l'effet du coup en fonction de sa grandeur

Lorsque les sujets sont parvenus à identifier la "limite" de 120 degrés permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale, on leur demande s'ils croient que la limite va demeurer la même (soit à 120 degrés de Oi) si la grandeur du coup n'est plus égale à la vitesse initiale. Seules deux étudiantes (NAD. et ANA., Grpe 2) ont la possibilité d'explorer les situations dans lesquelles la grandeur du coup diffère de la vitesse de départ.

Voici quelques exemples illustrant cette différenciation progressive de la limite en fonction de la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale.

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 5) - Si la grandeur du coup n'est plus égale à la vitesse, es-tu quand même capable de prévoir un peu si la vitesse va augmenter ou diminuer ? *Oui... si je mettais ma grandeur à 40, ça ferait le double de ma vitesse, ça veut dire que ça va augmenter le double de la normale...* (soit quand Gc = Vi). - (Elle établit donc une proportionnalité directe entre la valeur de l'écart et celle de l'augmentation de vitesse). - *Disons que je mets l'orientation à 164, ce serait supposé augmenter de 0,3 mais ça va augmenter du double...* - Elle l'essaie et constate que la vitesse augmente plus qu'elle ne l'anticipait. - *Il était dans le champ de 120 degrés et comme la grandeur était plus grande, ça l'a augmenté* (i.e. la vitesse) *encore plus...* - Si le coup n'est pas de même grandeur que la vitesse, est-ce que c'est encore avec un écart de 120 degrés que la vitesse va se conserver ? - *Ça ne marchera plus... on a pas donné la même grandeur de coup alors ça brise l'équilibre... si je mettais la grandeur à*

40 ... la vitesse est à 20, disons que je voudrais garder la même vitesse... - Est-ce que tu augmenterais ou si tu diminuerais l'écart entre les deux orientations ? - *... Bien je lui donnerais un plus grand écart parce que plus tu donnes un petit écart et plus ça va augmenter et si tu lui donnes un plus grand écart, si la vitesse avait été de 20, ça l'aurait diminuée... mais si je donne une plus grande force...* - Et dans cette situation (i.e. coup de Gc = 40 soit deux fois Vi), serais-tu capable de conserver la vitesse ? - *Bien dans ma tête, je doublerais 165, ça ferait 330... mais ça ne marchera pas...* - Ça ne te rappelle pas une situation que tu as déjà essayée ? ... Si tu donnais le coup en direction opposée à celle de ton mouvement! - *Je la mettrais à 225... ? Elle va rester à la même vitesse il me semble. Si la grandeur était de 20, elle s'arrêterait mais c'est encore un autre 20 dans l'autre sens alors ça va rester à la même vitesse il me semble... Ça veut dire que quand la grandeur est le double* (i.e. de la vitesse), *elle ne pourra plus jamais diminuer!* - Peux-tu m'expliquer ? - *Disons que je mettrais n'importe quelle orientation, comme 180 c'est l'opposé, l'autre côté aussi ça va être pareil, elle va augmenter...* - Est-ce qu'il y aurait moyen, avec un coup de grandeur 25 ou 30, de conserver la vitesse ? - *Oui, il doit sûrement y en avoir sauf que ce serait moins loin que 225. Par exemple, si je mettais une grandeur de 30, ce serait entre 165 et 225... peut-être au milieu...* (30 étant à mi-chemin de 20 et de 40).

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 5) - Si ta grandeur n'est plus égale à ta vitesse, est-ce que ça va toujours être un écart de 120 ? - *Peut-être pas... si je mets le double... je me dis que si je mets une orientation de 45, la vitesse va augmenter, elle va être à 60 puis si je mets une orientation de 225, ça va aller en diminuant je pense... je vais l'essayer. Ah non! Elle va dans le sens contraire. La vitesse n'a pas changé...* - Tu viens d'essayer un coup de grandeur 40 et qu'est-ce que tu remarques ? - *Ce n'est pas la même chose en tous cas* (i.e. la même limite) *parce que si j'avais laissé la grandeur comme la vitesse, la balle se serait arrêtée mais comme j'avais mis le double, elle va en reculant... si je mets l'orientation à 165, ce ne sera pas la limite.* - Crois-tu qu'avec un coup deux fois plus grand que la vitesse tu peux faire diminuer ta vitesse ? - *Sûrement qu'elle va diminuer. À 225, elle reste pareille. Je vais essayer 270... Elle a encore augmenté... J'aurais cru que 270 c'était plus proche de 225 que de 45...* - On lui fait réaliser que 225 (soit Oi + 180) est l'écart maximum entre l'orientation initiale et celle du coup et qu'avec cet écart, la vitesse ne diminue pas, mais se conserve. - *J'avais mis une grandeur égale au double de la vitesse et je ne pouvais pas la faire diminuer. Si je la mettais à 30* (soit entre Vi qui est de 20 et son double qui est de 40), *je dirais que je ne pourrais pas encore la faire diminuer... Je vais essayer avec une Oc de 225. La vitesse*

a diminué de 10, ça veut dire que le 225, ce ne sera pas cette direction là qui va faire que la vitesse va rester la même, ça va être un autre point... À 225, elle diminue, à 270, elle augmente encore un peu. Donc ce serait entre 225 et 270 que sa vitesse ne changerait pas. Si on met une grandeur égale à la vitesse et l'orientation opposée, ça va s'arrêter. Puis il y a un point où la vitesse va rester pareille. Entre ce point là et 45, ça va augmenter puis entre ce point là et 225 ça va diminuer. On a trouvé que c'était un écart de 120. Mais si la grandeur du coup est différente de la vitesse, il va falloir trouver la limite... elle va toujours changer, ça dépend de la grandeur du coup. Quand on met le double de la vitesse, le point où elle reste pareille, c'est 225, donc ça ne pourra pas diminuer puis ce doit être la même chose si on met une grandeur supérieure à 40, elle ne pourra pas non plus diminuer.

Ces sujets savent que le changement de vitesse est d'autant plus grand que le coup est grand. En reliant cet élément de connaissance à ce qu'ils viennent de découvrir à propos du rôle de l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup, ils font donc assez facilement l'hypothèse qu'il faudra un écart d'autant plus grand que le coup est grand. En voulant donner un coup de grandeur supérieure à la vitesse initiale, ils choisissent spontanément une grandeur égale au double de la vitesse. Or, cette situation donne lieu, parfois après quelques tâtonnements, à une découverte extrêmement intéressante.

En effet, lorsque la grandeur du coup est égale au double de la vitesse initiale, celle-ci se conserve lorsqu'on donne un coup en direction opposée à celle du mouvement. Or 180 degrés représentant l'écart "maximum" entre l'orientation initiale et celle du coup, à partir du moment où la grandeur du coup est égale ou supérieure au double de la vitesse initiale, celle-ci ne pourra jamais diminuer, quelle que soit l'orientation du coup. Cette découverte leur permet de situer approximativement (soit entre 165 et 180 par rapport à O_i) la limite permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale, lorsque la grandeur du coup est supérieure à la vitesse initiale mais inférieure au double de la vitesse initiale.

8.1.2 Sujets de secondaire V

1/ Anticipations spontanées

Les représentations initiales des étudiantes de secondaire V s'apparentent beaucoup à celles des sujets de secondaire III, même si les premières possèdent, en

plus, des éléments de connaissance à propos des vecteurs qui leur permettent déjà de faire certaines prévisions qualitatives.

Tous les sujets de secondaire V, qui ont spontanément recours à la notion de vecteur (soit 4 sur 5), comprennent que les changements de vitesse dépendent à la fois de la grandeur du coup et de l'écart plus ou moins important par rapport à l'orientation initiale. Ils font l'hypothèse, tout comme les sujets de secondaire III, qu'il existe une orientation à partir de laquelle la vitesse commence à diminuer. Mais ils ne savent pas davantage quelle est cette orientation et ils ne peuvent prévoir approximativement les changements de vitesse que dans les cas extrêmes où l'orientation du coup est soit très proche ou au contraire très éloignée de celle du mouvement.

Une étudiante, LUC., arrive à effectuer quelques approximations de la vitesse finale en termes de longueur du vecteur résultant mais elle ne différencie pas plus que les autres sujets la "limite" permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale, selon que la grandeur du coup est ou non égale à la vitesse initiale.

Voici quelques exemples illustrant les représentations initiales des sujets de secondaire V.

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 3) - *Ça dépend de l'orientation de mon coup. Mes deux orientations je les vois vraiment dans ma tête puis si elles sont vraiment près de 45* (i.e. orientation initiale), *disons 90 degrés de différence, ma vitesse va augmenter parce que mes deux orientations ne combattent pas l'une avec l'autre, elles sont un peu dans le même sens. Tandis que si j'ai un écart de 100 degrés de différence... ma vitesse va diminuer jusqu'à l'opposé parce que mes coups vont avoir tendance à combattre l'un avec l'autre.*

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 3) - Elle adopte spontanément la stratégie qui consiste à donner un coup de même grandeur que la vitesse et fait l'hypothèse que c'est à plus de 90 degrés de l'orientation initiale que la vitesse devrait diminuer. - *Je divise mon système en 4 quadrants avec mon mouvement initial qui serait une droite. J'ai mon mouvement initial qui a une orientation de 45, je prends sa perpendiculaire et ça me donne 4 quadrants. C'est mes deux droites puis j'ai regardé ça par rapport à mon dessin. Il y a un quadrant que j'ai expérimenté et ça augmentait ma vitesse. J'ai essayé de voir dans quel sens il pouvait être un peu contraire à mon mouvement, pas totalement parce qu'il y a seulement un cas. J'ai calculé que la poussée que je donnerais dans mes deux quadrants qui sont perpendiculaires au mouvement* (soit à 90 degrés ou moins du mou-

vement initial), *ces deux quadrans là poussent plus la balle dans le sens qu'elle a déjà* (i.e. augmentent sa vitesse).

MAR., Sec. V, Grpe 2 (séance 2) - *Si on fait un coup de la même grandeur mais avec une orientation plus près de l'opposé de l'orientation de la balle, ça diminue sa vitesse tandis que si elle est plus près de l'orientation initiale que de son opposé, ça augmente sa vitesse... Je vais essayer avec les grandeurs pour voir si ça fait une différence... sûrement que quand la grandeur du coup est plus petite... s'il est plus proche de l'orientation initiale ça va l'augmenter aussi et s'il est plus proche de son opposé ça va la diminuer.*

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 3) - En explorant les changements d'orientation, elle choisit par hasard un coup de même grandeur que la vitesse à 120 degrés du mouvement initial ce qui a pour effet de conserver la vitesse en ne modifiant que l'orientation. - Si tu avais donné le coup dans une orientation plus petite que 165 (Oi est de 45), est-ce que la vitesse aurait augmenté ou diminué ? - Elle donne un coup de Gc = Vi et de Oc = 100. - *Je dirais que ma vitesse va être plus grande que 20... Je ne sais pas si la limite ne serait pas avec 90 degrés d'écart... Je me disais qu'avec 90 degrés d'écart, quand tu donnes un coup, elle augmente, à 90 degrés d'écart aussi elle augmente et peut être que quand il y a plus que 90, elle recommence à diminuer... puis il y aurait peut être aussi, pour expliquer que tout à l'heure la vitesse finale donnait 20* (soit égale à Vi), *un angle qui, quand on l'additionne à notre mouvement initial, pourrait donner exactement la vitesse, je ne sais pas si c'est ça...*

Ces sujets conçoivent donc l'existence d'une "limite" à partir de laquelle la vitesse cesse d'augmenter et ils font la même hypothèse que les sujets de secondaire III à savoir que, c'est à partir de 90 degrés par rapport au mouvement initial que la vitesse devrait commencer à diminuer, la grandeur du coup étant égale à la vitesse initiale. Même LUC., qui vient pourtant de constater qu'un coup donné à 120 degrés du mouvement initial a pour effet de conserver la vitesse, ne relie pas cet écart de 120 degrés à la "limite" à partir de laquelle la vitesse cesse d'augmenter pour commencer à diminuer.

Une seule étudiante de secondaire V (HEL., Grpe 2), n'a qu'une représentation assez vague du rôle de l'écart et ne différencie pas très bien, au niveau de l'explication, les changements de vitesse des changements d'orientation. Lorsqu'on lui suggère de donner des coups de même grandeur que la vitesse, elle ne semble pas saisir l'intérêt de cette stratégie et persiste à donner des coups de grandeurs et d'orientations différentes de la vitesse et de l'orientation initiales. Voici comment elle

explique l'influence de l'orientation du coup sur le changement de vitesse, au terme de la séance 5.

HEL., Sec. V, Grpe 2 (séance 5) - *C'est que plus on met une orientation pas tellement loin... la vitesse va vraiment prendre beaucoup de la grandeur. Si on met une orientation loin, l'orientation va lui prendre un peu de ce qu'elle a puis elle va aller moins vite. Elle va rajouter mais elle va aller moins vite que si on lui donnait une plus petite orientation* (i.e. une Oc plus proche de Oi)... *Dans le fond, si elle s'arrête ici, plus on va lui donner une Oc* (i.e. proche de l'opposé) *elle va aller moins vite. Si elle va tout le temps plus vite quand on monte vers ici, vers ici, elle irait moins vite.*

2/ <u>Découverte de la limite conservant au mouvement sa vitesse initiale quand Gc = Vi</u>

On retrouve, là encore, une démarche tout à fait similaire à celle des sujets de secondaire III. Ayant constaté qu'avec un écart de 90 degrés par rapport au mouvement initial la vitesse continue d'augmenter, les sujets sont amenés à essayer différentes valeurs d'orientations, la grandeur du coup étant toujours égale à la vitesse, dans le but de découvrir à partir de quand la vitesse commence à diminuer. Ces manipulations vont conduire, par approximations successives, à la découverte empirique de la "limite" de 120 degrés au-delà de laquelle la vitesse diminue.

Voici quelques exemples illustrant cette étape de la démarche des sujets.

MAR., Sec. V, Grpe 2 (séance 5) - *Si mon mouvement est à 45... je dirais que de 315 à 135 ce serait porté à augmenter puis de 135 à 315 ce serait porté à diminuer... Je sais qu'à 120, l'autre fois, ça avait donné la même vitesse. Ça devait peut-être justement être cela la limite entre les deux vu que c'est la même vitesse... je ne sais pas si ça va donner la même chose si je rajoute 120 à 45... C'est ça, ça n'a pas augmenté ni diminué. Si je mettais 150* (écart de 115), *je pense que la vitesse augmenterait. C'est ça, elle a augmenté mais je ne sais pas pourquoi c'est 120... Bien 0, 120, 240, ça divise par trois... ça fait des triangles équilatéraux...*

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 3) - À partir de quand tes deux orientations vont "combattre" l'une avec l'autre ? - *La limite ? Je ne serais pas capable de le dire. Je pense que même à 90 degrés d'écart ma vitesse diminuerait parce qu'ils combattent un peu, ils ne sont pas à l'opposé mais dans des directions pas mal différentes.* - Elle essaie successivement des coups à 90, 100, 110 puis 120 degrés de Oi, ce qui l'amène à découvrir que c'est à 120 degrés d'écart par rapport au mouvement initial que la vitesse

se conserve. - *J'ai trouvé une loi générale. Quand la grandeur est égale à la vitesse et que j'ai 120 degrés d'écart entre l'orientation du coup et l'orientation de mon mouvement, ma vitesse finale est égale à la vitesse initiale et à la grandeur du coup.* - Elle l'essaie de nouveau en partant d'un mouvement initial à 0 degré. - *Je mets la grandeur à 20 et l'orientation à 120 qui est mon écart critique et je devrais avoir une vitesse de 20... C'est ça, je pense que ça marcherait tout le temps. Je ne vois pas pourquoi ça changerait en fonction du coup qui a produit le mouvement initial. J'ai l'impression d'avoir découvert quelque chose que personne n'a jamais découvert avant moi...* - À la séance 5, on introduit la représentation graphique des vecteurs et on lui demande si elle comprend pourquoi l'écart conservant la vitesse initiale est de 120 degrés. - *Oui, je fais plus le lien. C'est la première fois que je vois des triangles dans des vecteurs. Avant, je voyais juste des vecteurs. Mais je viens de penser que si je veux telle chose, telle chose et qu'ils sont tous pareils, ça fait un triangle équilatéral.*

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 5) - Elle vient de découvrir, après quelques essais, la limite de 120 degrés. - *Il y a 240 et 120. Ces deux valeurs-là conservent la vitesse. Je ne sais pas s'il y en aurait d'autres.* - Elle essaie une Oc de 300 (Oi est de 0) et constate que la vitesse augmente. Elle en conclut : *Il y a seulement ces valeurs-là. Tout ce qui est entre 240 et 360 et entre 360 et 120, la vitesse augmente. 240 et 120 conservent la vitesse et les autres valeurs d'orientation diminuent la vitesse.* - On introduit alors la représentation graphique des vecteurs ce qui l'amène à découvrir pourquoi l'écart conservant au mouvement sa vitesse initiale est de 120 degrés quand Gc = Vi. - *Je cherchais pourquoi le 120 mais comme ça c'est clair. Comme on a trois côté égaux, donc trois angles égaux, ça ne peut pas être autre chose que 120.*

Ces données nous permettent de constater que la démarche des sujets de secondaire V est tout à fait analogue à celle des sujets de secondaire III puisque la découverte du 120 degrés se fait de façon purement empirique, à partir des manipulations effectuées dans le but de découvrir à partir de quand la vitesse diminue. Leurs connaissances préalables à propos des vecteurs ne leur permet pas de prévoir davantage, d'une part, qu'il existe une limite où la vitesse initiale se conserve et, d'autre part, où se situe cette limite. Toutefois, le recours à la représentation graphique des vecteurs, une fois identifiée la limite, les aide à comprendre pourquoi cet écart est de 120 degrés quand la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale, ce que les sujets de secondaire III ne sont pas encore en mesure de faire. En effet, 4 étudiantes sur 5 relient tôt ou tard l'égalité de

la vitesse initiale, de la grandeur du coup et de la vitesse finale, à des triangles équilatéraux.

3/ Différenciation de l'effet du coup en fonction de sa grandeur

Seules trois étudiantes ont la possibilité d'explorer, au cours de la séance 5, les situations dans lesquelles la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale. Elles font aisément l'hypothèse qu'il faudra un écart d'autant plus grand que le coup est grand. L'exploration de ces situations conduit, là encore, à la découverte d'un lien entre la conservation de la vitesse, dans les cas où la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale, et la représentation graphique des vecteurs sous la forme d'un "triangle isocèle".

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 5) - Si la grandeur du coup n'est plus égale à la vitesse qu'est-ce qui va se passer avec ton écart de 120 ? - *Si je lui donne un coup de grandeur 25, mon écart de 120 ne restera plus le même, la vitesse ne demeurera pas la même, elle va augmenter et l'orientation ne sera pas exactement en plein milieu. Quand je donne un coup de grandeur 30 et que ma vitesse est de 20, je peux trouver un angle pour lequel ma vitesse finale va être de 20, comme je l'ai fait quand la grandeur du coup était égale à la vitesse... Il faut que j'augmente mon écart d'orientation de plus de 120...* - Après avoir essayé successivement une Oc de 135 puis de 140, elle en conclut que la limite va se situer entre ces deux valeurs d'orientations puisqu'à 135 la vitesse augmentait qu'à 140, elle diminuait. - *Si j'ai un grand écart, il va falloir que je donne un grand coup.*

MAR., Sec. V, Grpe 2 (séance 5) - *Si Oi était à 0 avec une Vi de 20 et que je donnais une Gc de 40 à 180 degrés, ça gardait la même vitesse. Si la grandeur du coup est deux fois plus grande, j'ai l'impression que la vitesse ne diminue jamais mais qu'elle augmente... je ne sais pas avec un angle de 175 mais j'ai l'impression que la vitesse augmenterait... Je suis pas mal sûre que ce serait la même chose avec 185, c'est seulement quand c'est 180 que la vitesse reste pareille. Peut-être avec une grandeur de 30... 30 c'est entre 20 et 40. Quand la grandeur est égale à la vitesse la limite est 120 puis quand c'est deux fois plus grand, c'est 180. Alors je penserais que s'il y a un endroit où la vitesse reste la même ce serait entre 120 et 180... J'ai essayé à 150 et la vitesse diminue. À 135, elle augmentait, ça veut dire que ce serait entre 135 et 150.* - Elle essaie encore différentes valeurs d'orientation, avec un coup de grandeur inférieure à la vitesse et parvient, là encore, à situer au moins approximativement la limite. À la fin de la séance, on lui précise que si elle dessinait ses vecteurs, ça lui donnerait un triangle iso-

cèle et on lui demande si elle comprend pourquoi. - *Oui parce qu'il faut que la vitesse finale soit égale à la vitesse initiale.*

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 5) - Si la grandeur du coup est différente de la vitesse, est-ce que c'est encore possible d'avoir une vitesse finale égale à la vitesse initiale ? - *Oui, en prenant un triangle isocèle cette fois... Il y a une histoire de rapport entre ma grandeur et ma vitesse.* - Elle essaie spontanément un coup de Gc = 40 (soit 2 fois la vitesse initiale) avec une Oc de 180, puis un coup de grandeur 30 à 285 puis elle explique : - *Il n'y a pas qu'une valeur d'orientation qui fait que ça se conserve et c'est normal. Ma grandeur change, donc mon orientation va changer. C'était plus simple quand la grandeur du coup était égale à la vitesse. C'est pour ça qu'on ne peut pas donner une valeur clé* (i.e. quand Gc est différente de Vi). *Il faut tâtonner.*

Au terme de cette exploration, 4 étudiantes sur 5 sont parvenues à reconstituer la "limite" de 120 degrés permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse. Trois d'entre elles différencient clairement les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse de ceux où elle est différente et elles font le lien avec la représentation graphique des vecteurs (triangles équilatéraux et isocèles).

Résumé

La démarche d'exploration des étudiantes de secondaire V est très similaire à celles des étudiantes de secondaire III, même si ces dernières n'ont aucune connaissance préalable à propos des vecteurs. En effet, 3 sujets de secondaire III découvrent empiriquement la limite de 120 degrés et 2 d'entre eux parviennent à différencier les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse de ceux où elle est différente. On retrouve, chez la très grande majorité des sujets (aussi bien ceux de secondaire V que ceux de secondaire III), l'hypothèse selon laquelle la limite à partir de laquelle la vitesse commence à diminuer se situe à 90 degrés du mouvement initial.

Si les étudiantes de secondaire V possèdent dès le départ une certaine représentation "vectorielle" de la vitesse, leur compréhension qualitative des changements de vitesse n'est guère plus élaborée que celle des sujets de secondaire III. Ce qui les différencie principalement, au terme de l'exploration, c'est la capacité qu'elles ont d'expliquer la conservation de la vitesse initiale, aussi bien dans les cas où la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale que dans ceux où elle est égale à la vitesse de départ, en relation avec la représentation géométrique des vecteurs (triangles équilaté-

raux et isocèles). Autrement dit, elles parviennent à dépasser le simple niveau de la constatation (Vi se conserve avec un écart de 120 degrés quand Gc = Vi) pour atteindre celui de l'explication (i.e. pourquoi c'est précisément avec un écart de 120 degrés que la vitesse finale est égale à la fois à la vitesse initiale et à la grandeur du coup).

8.2 Étapes et processus d'équilibration en jeu dans la construction du schème de l'écart

La construction du schème de l'écart procède, comme celle des précédents, de la rectification progressive des schèmes antérieurs par approximations successives. Le sujet part de ce qu'il sait, essaie de voir dans quelle mesure ses connaissances préalables s'appliquent ou non, fait certaines hypothèses, les teste et en abstrait des éléments d'information qu'il utilise pour élaborer de nouvelles hypothèses. Ces processus l'amènent à découvrir peu à peu, non pas comment calculer la vitesse finale avec exactitude dans tous les cas, mais comment prévoir, à partir des situations dans lesquelles on peut effectuer des anticipations précises, si la vitesse aura plutôt tendance à augmenter ou au contraire à diminuer. La construction de ce schème constitue un exemple intéressant du processus d'élaboration d'un raisonnement qui consiste à générer de nouvelles propositions en appliquant des règles d'inférences sur d'autres propositions. Le point de départ de cette construction réside dans l'évocation et la mise en relation appropriées de divers éléments de connaissance acquis au cours des phases antérieures.

8.2.1 Étapes de construction du schème

L'observation de la démarche des sujets nous amène à distinguer trois grandes étapes dans la construction progressive du schème de l'écart. Ces étapes sont analogues à celles que l'on trouve dans la construction du schème de la moyenne.

1ère étape : elle correspond simplement à la capacité de raisonner en termes d'écart plus ou moins important entre l'orientation initiale et celle du coup. Elle suppose la capacité de tenir compte du mouvement initial, dans l'anticipation des changements de vitesse, et de mettre en relation les situations unidimensionnelles où le coup est donné, soit dans la même orientation que le mouvement, soit en direction opposée à

celle du mouvement. Le sujet comprend que la vitesse initiale augmente d'une valeur inférieure à la grandeur du coup, lorsque l'orientation du coup diffère de celle du mouvement, et que l'augmentation de vitesse est d'autant plus grande que l'orientation du coup se rapproche de celle du mouvement initial.

2ème étape : elle correspond à la découverte de la "limite" de 120 degrés, permettant de conserver au mouvement sa vitesse, quand la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale. Elle permet de circonscrire le "champ" des orientations qui font augmenter la vitesse et le "champ" des orientations qui font diminuer la vitesse lorsqu'on donne des coups de même grandeur que la vitesse, dans différentes orientations. La limite de 120 degrés constitue ici le "référent" en fonction duquel le sujet parvient à prévoir si la vitesse va diminuer ou si, au contraire, elle va augmenter.

3ème étape : elle correspond à la mise en relation du rôle de la grandeur avec celui de l'écart. Le sujet comprend que la limite devrait être inférieure ou supérieure à 120 degrés, selon que la grandeur du coup est inférieure ou supérieure à la vitesse initiale. Là encore, la "limite" de 120 degrés, permettant de conserver la vitesse initiale quand la grandeur du coup est égale à la vitesse, va servir de point de référence pour évaluer, approximativement, entre quelle et quelle orientation devrait se situer la "limite", si la grandeur du coup diffère de la vitesse du mouvement.

8.2.2 Processus de passage d'une étape à la suivante

L'analyse des principaux processus, intervenant dans la construction progressive du schème, nous permettra de voir comment, à travers une démarche d'expérimentation active, les sujets sont progressivement amenés à préciser et à enrichir leur représentation initiale des changements de vitesse, en termes d'écart plus ou moins grand entre l'orientation du coup et celle du mouvement. On peut voir, dans cette représentation globale de départ, un exemple de ce que diSessa (1988) qualifie de *"primitives phénoménologiques"*, c'est-à-dire de connaissances fragmentaires, relativement simples et issues d'expériences communes, qui servent à interpréter certains phénomènes. L'intuition du rôle de l'écart est en effet liée à l'idée simple selon laquelle *plus deux choses sont éloignées l'une de l'autre, moins elles ont de chance de s'influencer mutuellement*.

1/ Mise en relation des observables appropriés

Lorsqu'ils abordent la troisième phase d'exploration, les sujets ont eu le temps de se familiariser avec le micromonde et ils ont déjà acquis plusieurs éléments de connaissance qui vont faciliter la compréhension des changements de vitesse bidimensionnels. D'une part, ils savent déjà, pour l'avoir maintes fois observé, que la relation entre la grandeur du coup et la vitesse initiale n'est ni additive ni soustractive et que le changement de vitesse ne peut être supérieur à la grandeur du coup, quand l'orientation du coup diffère de celle du mouvement. D'autre part, les connaissances acquises à travers l'exploration des changements d'orientation bidimensionnels (phase II) incitent les sujets à penser en termes d'interrelations des variables en jeu. Elles leur permettent de mieux saisir l'utilité de la stratégie d'exploration qui consiste à maintenir la grandeur du coup égale à la vitesse du mouvement, pour identifier séparément l'action de chacune des variables. Ce sont là divers éléments de connaissance pertinents sur lesquels le sujet pourra s'appuyer pour élaborer un raisonnement approprié, lui permettant d'explorer l'effet de l'orientation, puis celui de la grandeur du coup, sur les changements de vitesse bidimensionnels. Par ailleurs, alors que dans le cas des changements d'orientation, il n'y a pratiquement aucun point commun entre situations unidimensionnelles et situations bidimensionnelles, la compréhension des changements de vitesse, dans les situations bidimensionnelles, va précisément s'appuyer sur la capacité de relier entre elles certaines situations, au sein même du schème unidimensionnel. Pour parvenir à comprendre les relations qualitatives en jeu dans les situations bidimensionnelles, les sujets devront à la fois identifier ce qu'elles ont en commun avec les situations unidimensionnelles et ce qui les en différencie. Il importe également de pouvoir dissocier les changements de vitesse des changements d'orientation puisque ce ne sont pas les mêmes relations entre les variables (i.e. mouvement initial et coup) qui interviennnent.

Le principal obstacle à l'établissement de relations appropriées réside précisément dans le fait de ne pas dissocier suffisamment les changements de vitesse des changements d'orientation et de ne pas envisager séparément l'action respective de chacune des variables (i.e. grandeur et orientation). Comme dans le cas des changements d'orientation, il est plus difficile, en raison de l'interdépendance des variables en jeu, d'abstraire les relations pertinentes si l'on donne des coups dont la grandeur et l'orientation diffèrent de la vitesse et de l'orientation initiales. On trouve un exemple de ce type d'obstacle chez un sujet de secondaire V (HEL., Grpe 2) qui n'a pas spontanément recours à la dissociation des facteurs et au contrôle des variables. En effet, cette étu-

diante ne considère pas l'orientation du coup comme un facteur indépendant, qui a sa propre action, mais elle l'envisage sous une forme globale et plus ou moins indifférenciée du rôle de la grandeur. Elle a donc l'impression que ce que la balle prend à la grandeur du coup, pour changer d'orientation, elle l'enlève à la vitesse. Ce défaut de "dissociation" des facteurs conduit au raisonnement erroné selon lequel "plus la balle change d'orientation, moins elle augmente de vitesse et inversement". La diminution de vitesse devient en quelque sorte proportionnelle à l'ampleur du changement d'orientation. Ce que le sujet considère ici, ce n'est donc pas l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup, mais plutôt le changement d'orientation, c'est-à-dire l'écart entre l'orientation initiale et l'orientation finale. Il y a établissement de relations plus ou moins appropriées entre les variables puisque leurs actions respectives ne sont pas suffisamment décomposées, pour être ensuite recombinées, mais qu'elles sont envisagées globalement. Ceci constitue une exemple de construction d'une représentation partiellement erronée que le sujet conservera tant qu'elle lui semblera suffisamment fonctionnelle.

L'abstraction du rôle de l'écart va s'effectuer à partir de la mise en relation des situations unidimensionnelles opposées (soit, Oc = Oi et Oc = Oi + 180), dans lesquelles on donne un coup de même grandeur que la vitesse. Cette mise en relation des observables appropriés s'avère relativement aisée pour la très grande majorité des sujets. Elle est rendue possible par la "neutralisation" de la variable grandeur (Gc = Vi) qui permet d'envisager l'effet dû à l'écart entre les orientations (soit Oi et Oc) indépendamment de l'effet dû à la grandeur du coup par rapport à la vitesse du mouvement. À partir du moment où le sujet parvient à effectuer cette mise en relation, il est en mesure de comprendre l'effet de l'orientation du coup sur le changement de vitesse : pour une même grandeur de coup, le changement de vitesse est d'autant plus grand que l'orientation du coup se rapproche de celle du mouvement et il est d'autant moins grand que l'orientation du coup se rapproche de l'orientation opposée à celle du mouvement. Ce raisonnement, en termes d'"écart" plus ou moins grand par rapport à l'orientation initiale, constitue une véritable "heuristique", c'est-à-dire un outil de compréhension et d'exploration. Il va permettre aux sujets de faire des découvertes intéressantes et de raffiner leurs représentations initiales des changements de vitesse à travers l'exploration de l'effet de l'orientation du coup sur le changement de vitesse, la grandeur du coup étant égale à la vitesse.

2/ Différenciation du schème à travers son application à des situations variées

À partir du moment où les sujets raisonnent en termes d'écart plus ou moins grand entre l'orientation initiale et celle du coup, et qu'ils saisissent l'utilité de la stratégie qui consiste à maintenir la grandeur du coup égale à la vitesse initiale, ils disposent de suffisamment d'éléments de connaissance pour être en mesure de faire des hypothèses et d'effectuer, dans un certain nombre de situations, des approximations qualitatives correctes. Celles-ci vont leur permettre de vérifier, au moins partiellement, leurs hypothèses. La succession de ces hypothèses et stratégies, basées sur le raisonnement en termes d'écart, va conduire à la différenciation progressive du schème, à travers son application à des situations variées, et à l'identification de cas particuliers intéressants. Ces derniers vont servir à comprendre, petit à petit, les situations les plus complexes à partir des situations les plus simples.

a) Découverte d'un "référent" : limite à 120 degrés de Oi

L'utilisation du raisonnement en termes d'écart, appliqué aux situations dans lesquelles la grandeur du coup est maintenue égale à la vitesse, va permettre de circonscrire avec précision le "champ" des orientations qui font augmenter la vitesse et le "champ" des orientations qui la font diminuer. Les premières manipulations des sujets ont pour but de vérifier l'hypothèse concernant le rôle de l'écart en essayant successivement des coups dont l'orientation est proche, ou au contraire éloignée, de celle du mouvement. Ces manipulations sont sources d'informations importantes puisqu'elles permettent déjà d'identifier certaines valeurs d'orientation pour lesquelles la vitesse augmente et d'autres pour lesquelles la vitesse diminue. Par ailleurs, dans la mesure où elles confirment les anticipations du sujet, elles l'incitent à conserver sa représentation des changements de vitesse en termes d'écart. Les manipulations suivantes sont basées sur l'hypothèse d'une limite se situant à 90 degrés, ou encore à 180 degrés, du mouvement initial. Elles sont sources de "légers" déséquilibres dûs à la non-confirmation des anticipations liées à l'action. Cependant, l'erreur est ici essentiellement constructive parce que source d'informations qui vont amener le sujet à essayer successivement différentes orientations. En effet, ces choix ne sont pas arbitraires, mais guidés par les résultats de l'action antérieure. Ils reflètent une démarche d'expérimentation active qui consiste à essayer de découvrir, par approximations successives, à partir de quand la vitesse cesse d'augmenter pour commencer à diminuer. C'est pourquoi, bien que les sujets ne sachent pas au départ qu'il existe, à 120 degrés du mouvement initial, une "limite" permettant de

conserver au mouvement sa vitesse initiale, ils "intuitionnent" l'existence de cette limite et c'est précisément ce qui va leur permettre de la trouver.

Cette découverte du 120 degrés peut s'effectuer plus ou moins rapidement, mais elle est rendue pratiquement inévitable par le caractère non aléatoire des actions qui se succèdent, puisque chacune d'entre elles est reliée aux résultats des actions qui l'ont précédée. En effet, ces actions successives sont sources d'informations qui ont pour effet de réduire l'incertitude. Par exemple, si le sujet vient de constater qu'à 90 degrés du mouvement initial la vitesse augmente encore, mais qu'à 135 degrés du mouvement elle diminue, il a la certitude que l'orientation à partir de laquelle la vitesse commence à diminuer devrait se situer entre 90 et 135 degrés par rapport au mouvement initial. Les actions suivantes vont donc consister à essayer différentes orientations comprises entre ces deux valeurs. De même, la découverte ou la compréhension du caractère "symétrique" de l'écart est source d'inférences qui permettent de limiter le choix des actions à effectuer pour vérifier une hypothèse ou obtenir un résultat. C'est pourquoi tous les sujets qui raisonnent en termes d'écart finissent, tôt ou tard, par découvrir la limite de 120 degrés, à travers cette succession d'hypothèses, de stratégies et d'observations, sources de nouvelles hypothèses. La notion d'écart joue, à cet égard, le rôle d'"idée puissante" permettant de comprendre le nouveau à la lumière de ce qui est connu et d'unifier, au sein d'une même représentation, des éléments de connaissance acquis à travers une diversité d'expériences (ou de situations). Elle permet de circonscrire le champ des possibilités logiques puisque, à partir de ce moment, les sujets peuvent prévoir avec certitude si la vitesse va augmenter, diminuer ou demeurer la même.

b) Différenciation de la limite en fonction de la grandeur

L'identification de la "limite" fournit aux sujets un nouveau "cadre interprétatif" leur donnant accès à des informations qui ne l'étaient pas auparavant et qui vont s'avérer sources de nouvelles inférences. La différenciation progressive de la limite, en fonction de la grandeur, constitue un exemple intéressant de la façon dont le sujet parvient à élaborer de nouvelles connaissances en mettant en relation ce qu'il vient de découvrir (limite à 120 degrés du mouvement) avec ce qu'il sait déjà (plus on donne un grand coup, plus la vitesse change). De même que la "moyenne" constituait un référent pour comprendre, prévoir ou expliquer les changements d'orientation dans les situations où la grandeur du coup était différente de la vitesse initiale, c'est ici l'"écart de 120 degrés" qui va servir de "référent" permettant de prévoir approximativement les changements de vitesse, lorsque la grandeur du coup n'est plus identique à la vitesse initiale. La

mise en relation de ces éléments de connaissance conduit en effet à l'élaboration de l'hypothèse selon laquelle, pour que la vitesse se conserve, il faudra un écart d'autant plus grand que le coup est grand et d'autant moins grand que le coup est petit. Même dans le cas où le sujet fait, par erreur, l'hypothèse inverse, les actions auxquelles donnent lieu ces hypothèses et les résultats qu'elles produisent sont sources d'informations qui vont lui permettre de réajuster ses représentations initiales. C'est ainsi que l'identification de l'écart de 120 degrés est lui-même source de nouvelles découvertes. Cette différenciation progressive du schème, à travers son utilisation, permet de le raffiner encore davantage et pourra même conduire à la coordination progressive de divers schèmes entre eux.

3/ Coordination des schèmes entre eux à travers leur application simultanée à une même situation

a) Coordination du schème de l'écart avec le schème unidimensionnel

La coordination de ces deux schèmes repose sur l'utilisation d'une situation connue dans un contexte nouveau. Tous les sujets savent en effet, pour l'avoir déjà essayé, qu'un coup donné en direction opposée à celle du mouvement a pour effet de conserver la vitesse initiale s'il est deux fois plus grand que celle-ci. Or, cette situation, que l'on peut considérer comme un "observable", issu des coordinations effectuées au sein même du schème unidimensionnel, présente, sur certains points, des ressemblances avec la situation bidimensionnelle où l'on donne un coup de même grandeur que la vitesse, à 120 degrés du mouvement initiale. En effet, bien que ces situations diffèrent à plusieurs égards (grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale, caractère unidimensionnel vs bidimensionnel), dans les deux cas, le coup a pour effet de conserver la vitesse initiale en ne modifiant que son orientation. Cette ressemblance est précisément ce qui va constituer le "point de contact" entre ces deux schèmes. Lorsque les sujets, en cherchant à évaluer approximativement la "limite", dans les cas où la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale, choisissent spontanément un coup de grandeur 40, soit le double de la vitesse, ils n'évoquent pas nécessairement la situation unidimensionnelle où la vitesse se conserve. C'est pourquoi certains d'entre eux, bien qu'ils aient constaté qu'un coup deux fois plus grand que la vitesse conserve cette dernière, lorsqu'il est donné en direction opposée à celle du mouvement, essaient quand même de trouver une orientation permettant de faire diminuer la vitesse. Toutefois, l'application et/ou l'évocation simultanée de ces deux schèmes distincts (i.e. unidimensionnel et écart), en relation avec une même situation, conduit tôt ou tard à leur mise en relation. Celle-ci est alors

source de nouvelles inférences. Cette "coordination" permet en effet de prédire, qu'à partir du moment où la grandeur du coup est égale au double de la vitesse, celle-ci ne pourra jamais diminuer, quelle que soit l'orientation du coup, puisque l'orientation permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale (i.e. "limite") correspond à l'écart maximum entre deux orientations (soit 180 degrés). Le sujet peut dès lors savoir, avec certitude, où va se situer approximativement la "limite" (soit entre 120 et 180 degrés par rapport à Oi) pour un coup de grandeur supérieure à la vitesse initiale, mais inférieure à son double. C'est donc en essayant d'évaluer le rôle de la grandeur du coup, en relation avec celui de l'écart, que les sujets sont amenés à établir de nouveaux liens.

On trouve d'autres exemples intéressants de la façon dont un raisonnement s'élabore à travers son utilisation. C'est ainsi, par exemple, que quelques sujets font l'hypothèse, à partir des liens établis entre leurs manipulations successives, qu'il existe une certaine proportionnalité qualitative permettant de relier l'écart nécessaire entre les orientations (soit Oi et Oc), pour que la vitesse se conserve, à l'écart entre la grandeur du coup et la vitesse initiale. Bien que ces sujets n'aient pas eu le temps de travailler sur la base de ces hypothèses, on peut penser qu'elles auraient pu conduire à de nouvelles découvertes, notamment qu'il ne s'agit pas d'une proportionnalité simple. On voit ainsi comment l'élaboration d'un raisonnement, d'abord essentiellement qualitatif, peut éventuellement conduire à la recherche, et peut-être même à la découverte, d'outils de quantification plus précis. C'est en effet en prenant conscience à la fois des pouvoirs et des limites du raisonnement qualitatif que les sujets deviennent aptes à "donner un sens" à l'introduction d'"algorithmes" permettant d'effectuer des calculs plus précis.

b) Coordination du schème de l'écart avec le schème d'addition graphique des vecteurs

L'évocation simultanée du schème de l'écart avec le schème d'addition graphique des vecteurs est également source de coordinations nouvelles. Cette mise en relation de représentations antérieurement dissociées va contribuer à leur enrichissement mutuel et faciliter le passage du simple niveau de la constatation (la "limite" se situe à 120 degrés quand Gc = Vi) à celui de l'explication (les vecteurs étant égaux, les angles sont les mêmes, soit 360:3 = 120). Les sujets de secondaire V possèdent, pour la plupart, une assez bonne connaissance de la représentation graphique des vecteurs et de leur composition. On constate cependant qu'ils y ont assez peu recours dans l'exploration des changements de vitesse, sauf un sujet (LUC., Grpe 1) pour qui cette représentation est parfois source de confusion, liée à la compétition de deux représentations différentes

d'une même chose. Si le raisonnement en termes d'addition graphique des vecteurs leur permet de calculer la vitesse finale, en reproduisant les vecteurs à l'échelle, elle ne leur assure pas pour autant la capacité de prédire si la vitesse aura tendance à augmenter ou au contraire à diminuer. Inversement, si le raisonnement en termes d'écart suffit à assurer une bonne compréhension qualitative des changements de vitesse (exemple : avec les sec. III), on constate que le recours à la représentation graphique, en relation avec la représentation en termes d'écart, enrichit l'une et l'autre de ces deux représentations. C'est ainsi que les notions de triangles isocèles et équilatéraux servent à représenter tous les cas où la vitesse se conserve et à intégrer, au sein d'une même représentation, les changements de vitesse et les changements d'orientation bidimensionnels.

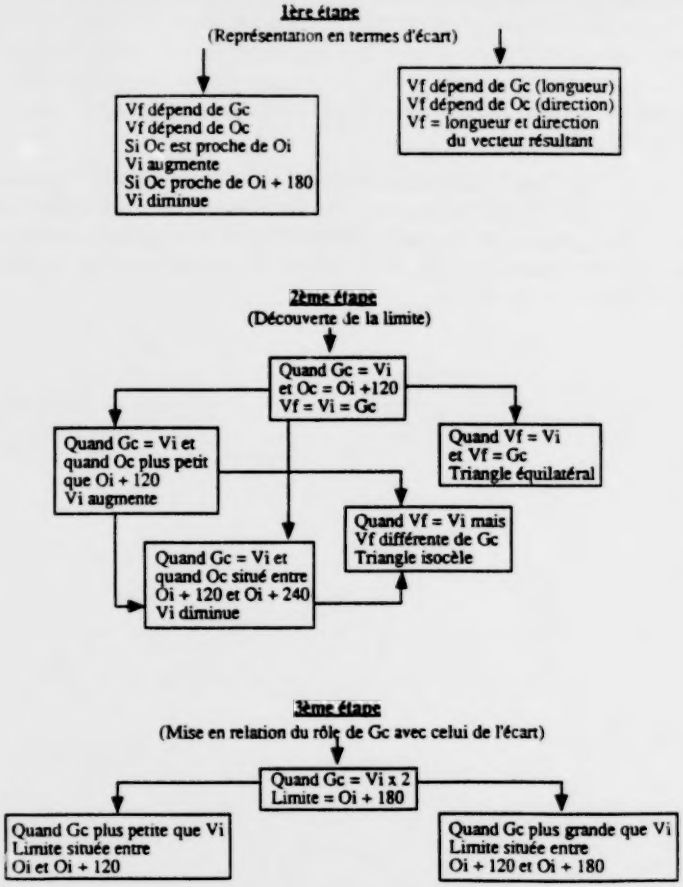
Ces deux exemples de "coordinations d'observables", qui sont eux-mêmes les produits de coordinations antérieures, illustrent quelques-uns des principaux mécanismes d'équilibration décrits par Piaget. Cette capacité de relier entre elles différentes représentations, pertinentes à la compréhension des changements de vitesse et d'orientation, pourra contribuer à l'élaboration éventuelle d'un schème de composition vectorielle, permettant d'unifier ces diverses représentations, tout en différenciant les conditions dans lesquelles leur utilisation s'avère la plus appropriée.

En résumé, lorsque le sujet construit un nouveau schème sur la base de ses connaissances antérieures, non seulement il établit des liens entre les éléments constitutifs du schème (coordinations à l'intérieur du schème), mais il établit également des relations entre les composantes de divers schèmes (coordination des schèmes entre eux). Pour ce faire, il doit à la fois identifier ce qu'ils ont en commun et ce qui les différencie. Certains éléments de connaissance peuvent s'avérer pertinents à plusieurs schèmes distincts et, par conséquent, se retrouver à différents niveaux, dans des organisations différentes. Par exemple, les idées d'écart, de limite, de symétrie, de proportionnalité qualitative, se retrouvent dans la plupart des schèmes, mais ils ne présentent pas nécessairement les mêmes relations. Un même élément de connaissance peut tantôt avoir le statut d'"observable" et tantôt celui de "coordination". Ce qui permet la construction de connaissances nouvelles à partir des connaissances antérieures et assure une certaine continuité entre un niveau de construction et un autre, c'est précisément qu'une partie d'un problème ou d'une situation nouvelle peut être ramenée à du connu. Autrement dit, tout n'est pas entièrement nouveau, sans quoi la rééquilibration serait pratiquement impossible. Une partie non négligeable de l'apprentissage consiste donc à reconnaître quelles sont, parmi les connaissances dont on dispose, celles sur lesquelles il convient

de s'appuyer. Si certaines composantes des représentations initiales du sujet peuvent faire obstacle, d'autres sont au contraire très utiles. C'est pourquoi les représentations ou schèmes déjà construits servent toujours de point de départ à la construction de nouveaux schèmes. L'analyse des processus intervenant dans la construction d'un schème met en évidence l'importance des processus de différenciation, de coordination et d'intégration hiérarchique, qui font émerger des totalités relativement complexes à partir d'éléments simples.

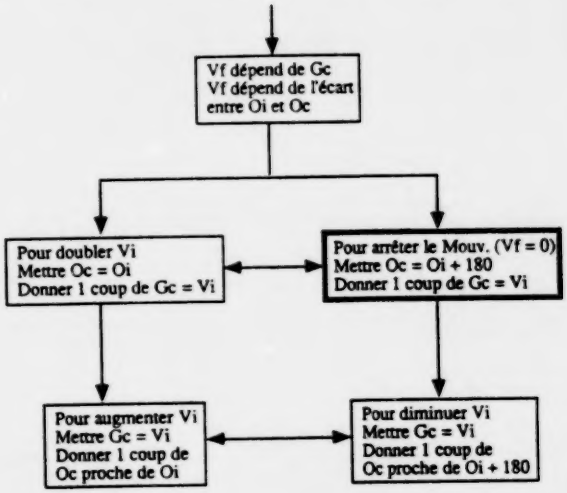
Les tableaux suivants présentent les trois grandes étapes de construction du schème de l'écart (Tableau 11), de même que la succession des principales stratégies intervenant à chacune de ces étapes (Tableaux 12, 13 et 14). Cette succession reflète l'élargissement progressif du champ d'application du schème ainsi que l'identification de ses conditions d'application.

Tableau 11 : Principales étapes de construction du schème de l'écart



Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

Tableau 12 : Principales stratégies observées à la 1ère étape de construction du schème de l'écart

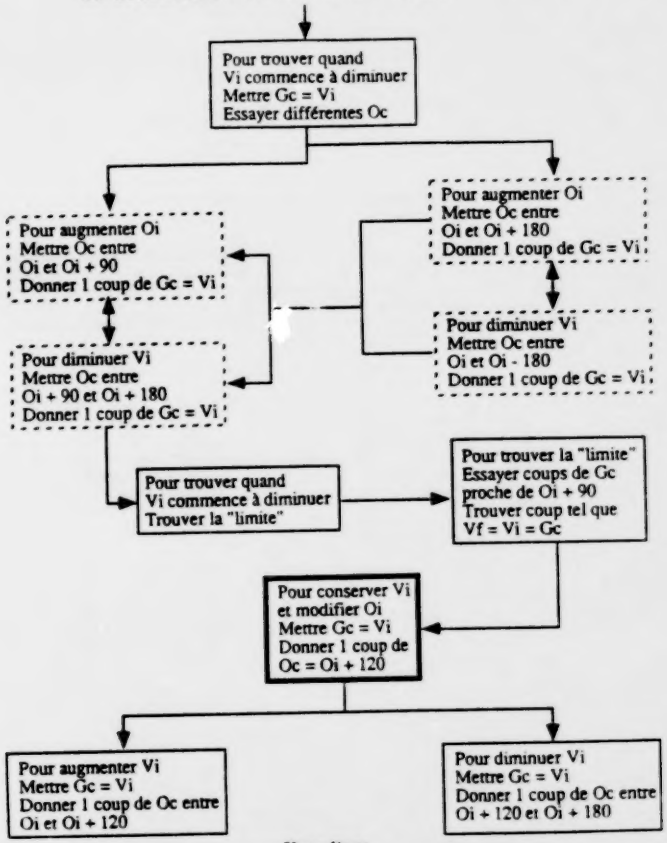


1ère étape

Stratégies reliées à la capacité de raisonner en termes d'écart

Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

Tableau 13 : Principales stratégies observées à la 2ème étape de construction du schème de l'écart

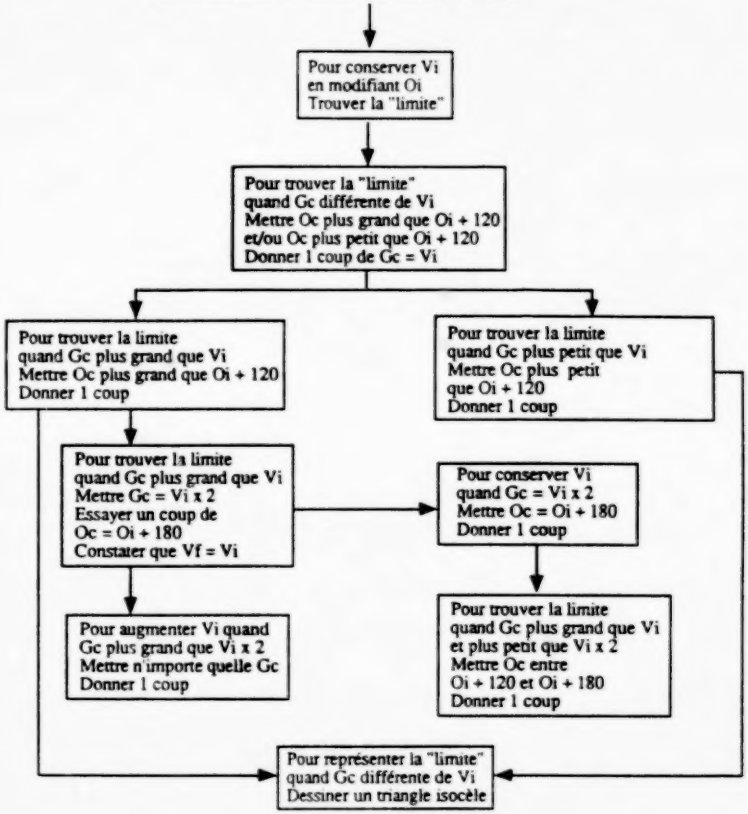


2ème étape

Stratégies conduisant à la découverte de la "limite" de 120 degrés

Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

Tableau 14 : Principales stratégies observées à la 3ème étape de construction du schème de l'écart



3ème étape

Stratégies conduisant à la mise en relation du rôle de la grandeur avec celui de l'écart

Légende (pour la lecture des tableaux)
Caractères gras: situations-clés qui vont servir de support à la coordination des schèmes entre eux.
Caractères pointillés: stratégies transitoires et/ou (partiellement) erronées.
Caractères pleins: stratégies adéquates.
Flèches: passage d'une stratégie à une autre.

CHAPITRE 9

RÉSULTATS DE LA DÉMARCHE D'EXPLORATION

9.1 Description des conduites observées aux séances six et sept

Les données recueillies nous permettent de constater qu'il n'existe pas de différences très significatives entre les conduites observées à la séance six et à la séance sept. Les connaissances acquises au cours de l'exploration s'avèrent en effet relativement stables chez tous les sujets. Dans ce chapitre, nous verrons donc ce qui en est de la compréhension des situations unidimensionnelles et de la compréhension des changements de vitesse et d'orientation dans les situations bidimensionnelles, au terme de l'exploration (séances 6 et 7), chez les sujets de secondaire III d'abord, puis chez les sujets de secondaire V.

9.1.1 Sujets de secondaire III

Les résultats obtenus montrent que les étudiantes de secondaire III ont acquis plusieurs nouveaux éléments de connaissance en ce qui a trait aussi bien aux situations bidimensionnelles qu'aux situations unidimensionnelles.

1/ Situations unidimensionnelles

Tous les sujets sont capables, à la séance 7 comme à la séance 6, d'anticiper ou de reconstituer correctement les relations permettant de prévoir les changements de vitesse et d'orientation dans les situations unidimensionnelles. Cette reconstitution peut parfois donner lieu à quelques tâtonnements, mais les sujets se montrent néanmoins capables de retrouver les principales relations qu'ils étaient parvenues à établir.

Voici quelques extraits de protocoles illustrant ce que les sujets évoquent.

Séance 6

MAT., Sec. III, Grpe 1 (séance 6) - *Pour arrêter ma balle... je mets l'orientation opposée puis la grandeur, je mets la même que la vitesse et si je donne mon coup, elle va s'arrêter. Si je veux changer seulement l'orientation et pas la vitesse, je mets l'orientation opposée, et la grandeur, je mets le double de la vitesse de mon mouvement. Puis si je veux garder la même orientation et augmenter sa vitesse, je laisse l'orientation à 45 et je donne un coup de grandeur plus grande.* - Pourquoi plus grande ? - *... je mets la grandeur plus petite et je donne mon coup... ah bien ça augmenté aussi... je mets n'importe quel nombre et ça augmente de ce nombre là.*

CAM., Sec. III, Grpe 2 (séance 6) - *Si je donne un coup de même grandeur, dans la direction opposée, la balle va s'arrêter. Si on avait donné le coup plus fort que la*

vitesse, elle aurait changé de direction. S'il avait été moins grand que la vitesse, la balle aurait ralenti.

Séance 7

NAD., Sec. III, Grpe 2 - (séance 7) - Je me souviens comment arrêter la balle en donnant un coup de la même grandeur que la vitesse... je mettais dans le sens opposé et ça l'arrêtait... Puis si je voulais augmenter du double, je laissais l'orientation à 45 et je mettais la grandeur à 20. Ça arrivait à 40.

ANA, Sec. III, Grpe 2 (séance 7) - J'ai laissé mon orientation comme elle était et j'ai donné un coup de 20... ça donne 40. Si je voulais la faire revenir à 20 (sous-entendu, la vitesse) il faudrait que je donne un coup contraire à l'orientation 45. Là, si je le donne à 225 et que je laisse la grandeur à 20, ça diminue. Si je lui donne un autre coup, elle s'arrête complètement et puis un autre, elle irait dans l'autre sens.

2/ Changements d'orientation bidimensionnels

En général, les changements d'orientation s'avèrent bien compris par la majorité des sujets, sauf un (MAT., Grpe 1). Ces étudiantes sont toutes capables d'expliquer (séance 6 et séance 7) que l'orientation finale va se situer "dans le milieu", soit à mi-chemin de l'orientation initiale et de celle du coup, si l'on donne un coup de même grandeur que la vitesse. Par ailleurs, elles différencient ces cas de ceux où la grandeur du coup diffère de la vitesse initiale. Enfin, les situations dans lesquelles on donne un coup à plus de 180 de l'orientation initiale sont expliquées par quatre étudiantes à la séance 6 et par trois d'entre elles à la séance 7.

Voici quelques exemples illustrant leur compréhension des changements d'orientation :

Séance 6

MAP., Sec. III, Grpe 1 (séance 6) - La vitesse est de 10 et l'orientation de 0. Je peux dire dans quelle direction la balle va aller. Supposons que je mets l'orientation du coup à 90, je peux prévoir qu'elle va aller à 45 mais seulement si je mets la même grandeur que la vitesse... si j'avais mis ma grandeur du coup plus grande que la vitesse, l'orientation du mouvement aurait été plus vers le 90 et si je l'avais mise plus basse que la vitesse, elle aurait été plus vers le 0 degré. - Voici comment elle explique l'effet d'un coup de même grandeur que la vitesse donné à plus de 180 degrés du mouvement initial. - La balle va à 45. Supposons que je veux mettre l'orientation du coup à peu près... vers 300, je peux prévoir mais il faut que je mesure l'écart à l'envers... je prends la différence entre 300 et 0, ça fait 60 puis entre 0 et 45 degrés. Je les ai additionné et ça fait 105... je l'ai divisé en deux, comme ça, ça va aller à la moitié des deux. Ça m'a donné 62.5 et je l'ai additionné à 300, ça fait 352.5. Quand il y a un écart de 180 degrés... je

pensais que ça irait dans le milieu (sous-entendu de Oi et de Oc) *parce que d'habitude ça va à la moitié mais là, comme c'est 180, on ne peut pas parce que c'est l'opposé...*

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 6) - *Je sais que si je garde toujours la même grandeur que ma vitesse, ça va aller en plein milieu du mouvement précédent et du mouvement que je veux lui donner. Si le coup est plus grand que la vitesse, elle va aller plus vers le mouvement que je veux lui donner et s'il est plus petit, elle va rester plus près du mouvement qu'elle a déjà.* - Quand ton coup a la même grandeur que la vitesse, est-ce que tu peux envoyer la balle dans n'importe quelle orientation ? - *Non... disons qu'elle est à 45 et que je voudrais l'envoyer à 180, ce ne serait pas possible parce que... 180, c'est le milieu de 45 et de 315 et, si je mets une orientation de 315, elle va aller à l'opposé, à 0 degré.*

Séance 7

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 7) - *Disons que je voudrais la faire aller à 90* (l'orientation initiale est de 45), *il faudrait que je mette l'orientation à 135. Mais si je donne une grandeur plus petite que la vitesse, ça va rester plus près de 45 alors que si je donne une grandeur de coup plus grande que la vitesse qui est déjà là, ça va aller plus proche de 135. Pour que ça aille dans le milieu, il faut vraiment que je donne la même grandeur que la vitesse. Ça ne sera pas plus attiré d'un bord que de l'autre.* - Elle explique correctement pourquoi on ne peut obtenir n'importe quelle Of quand Gc = Vi. - *On peut l'envoyer seulement dans certaines orientations...* (sous-entendu, avec un coup de grandeur égale à la vitesse). *Là, l'orientation est à 45. Si je voulais l'envoyer à 135, il faudrait que je donne un coup à 225... pour que 135 soit le milieu de 45 et de 225, mais ça ne marche pas parce que j'ai donné le coup contraire et ça arrêté la balle puisque la grandeur du coup était égale à la vitesse. Je pense que c'est partout ici que je ne pourrais pas l'envoyer parce que ça irait dans l'autre direction* (soit à l'opposé).

Toutes ces étudiantes parviennent donc à expliquer les changements d'orientation en se référant aux situations dans lesquelles l'orientation finale se situe "dans le milieu", la grandeur du coup étant égale à la vitesse initiale. Une seule d'entre elles (MAT., Grpe 1) rencontre, à la séance 6, les mêmes difficultés que lors de l'exploration. Elle évoque notamment une stratégie erronée qu'elle avait longuement testée à la séance 2, puis à la séance 3, sans toutefois se rappeller précisément en quoi elle consistait. Elle parvient à évoquer certaines situations. Par exemple, elle sait que l'orientation finale sera différente de celle du coup et elle se souvient qu'en donnant plusieurs coups dans une même orientation, mais différente de celle du mouvement, l'orientation de la balle n'était jamais identique à celle du coup. Mais elle ne différencie pas encore l'effet du coup sur le changement d'orientation en fonction de sa grandeur et les situations dans lesquelles on tente de modifier l'orientation initiale de 90 degrés, avec un coup de même grandeur que la vitesse, lui posent encore problème.

Voici un exemple illustrant les difficultés qu'elle éprouve.

MAT, Sec. III, Grpe 1 (séance 6) - *Ce que je ne comprends pas, c'est que mon orientation va à 45 puis je donne mon coup à 135, elle va dans le milieu, mais quand je fais la même chose avec l'opposé, que je lui donne un coup à 225, elle ne va pas dans le milieu... Supposons que l'orientation du mouvement allait vers le haut, puis je lui donne un coup vers la droite, elle ne perd pas complètement le mouvement qu'elle avait déjà alors elle va suivre le coup qu'on a donné et le mouvement qu'elle avait... je me dis que peu importe la vitesse et la grandeur que je mets, elle va toujours aller dans le milieu.*

La différenciation des situations unidimensionnelles et bidimensionnelles, en ce qui a trait aux changements d'orientation, n'est donc pas complète pour ce sujet puisqu'elle ne comprend pas encore très bien pourquoi, dans certains cas, la balle va dans le milieu et, dans d'autres cas, elle s'arrête. De plus, elle ne distingue pas encore l'effet du coup sur le changement d'orientation en fonction de sa grandeur. La séance 7 marque toutefois un progrès dans la compréhension des changements d'orientation. À travers les manipulations qu'elle fait, pour essayer d'expliquer comment le coup modifie l'orientation du mouvement, elle est amenée à différencier l'effet du coup en fonction de sa grandeur, ce qu'elle ne faisait pas auparavant.

Voici ce qu'elle explique lorsqu'on lui demande comment, à partir des manipulations qu'elle vient de faire, elle interprète les changements d'orientation.

MAT., Sec. III, Grpe 1 (séance 7) - *Bien, c'est selon la grandeur du coup. Si c'est la même... elle va aller au centre des deux... Si c'est mon coup qui est plus grand, ça va aller plus vers l'orientation de mon coup et si c'est la vitesse de mon mouvement qui est plus grande, ça va aller plus vers l'orientation de mon mouvement.*

3/ Changements de vitesse bidimensionnels

Tous les sujets, sauf un (MAP., Grpe 1) qui n'a pu passer à la phase III, comprennent que le changement de vitesse est relié à l'écart plus ou moins grand entre l'orientation initiale et celle du coup. Chez MAT. (Grpe 1), cette compréhension du rôle de l'écart n'est évoquée qu'à la séance 7 et elle demeure approximative, sans identification de la limite permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale et sans mise en relation du rôle de l'écart avec celui de la grandeur. Elle suppose que la "limite" se situe à 90 degrés du mouvement initial, mais sans trop savoir si la vitesse demeure la même, augmente ou diminue de la moitié de la grandeur du coup. Ce qu'elle sait, c'est que la vitesse ne doublera pas et que la balle ne s'arrêtera pas. Mais il n'y a pas de mise en relation du rôle de l'écart avec celui de la grandeur.

Voici comment ce sujet interprète les changements de vitesse à la séance 6 :

MAT., Sec. III, Grpe 1 (séance 6) - *C'est à partir de 90 degrés et moins que la vitesse va augmenter proche du double et c'est à partir de 90 degrés et plus qu'elle va avoir tendance à diminuer, se rapprocher de l'arrêt. Quand je lui donne la même grandeur que la vitesse* (et la même orientation), *elle double. Ici* (à 180 degrés de Oi), *elle arrête et ici* (à 90 degrés de Oi), *elle n'arrêtera pas et elle ne doublera pas, elle va aller aux alentours de 10* (soit la moitié de la grandeur du coup).

Les 3 autres étudiantes de secondaire III ont une représentation plus précise des changements de vitesse en fonction, à la fois de la grandeur du coup par rapport à la vitesse initiale, et de l'écart entre l'orientation du coup et celle du mouvement. Les anticipations du début, à la séance 7 comme à la séance 6, demeurent parfois plus ou moins précises en ce sens que, si elles comprennent le rôle de l'écart entre l'orientation initiale et celle du coup et savent qu'il existe une limite permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale, elles ne se rappellent pas toujours la valeur exacte (120 degrés) de cette limite. Un sujet (NAD., Grpe 2), toutefois, évoque presque tout de suite l'écart de 120 degrés qui conserve au mouvement sa vitesse initiale, lorsqu'on donne un coup de même grandeur que la vitesse, et une autre (ANA., Grpe 2) parvient à le reconstituer au cours de la séance, sans suggestion de la part de l'expérimentateur.

Séances 6 et 7

CAM., Sec. III, Grpe 2 (séance 6) - Elle comprend que les changements de vitesse dépendent à la fois de la grandeur du coup et de l'écart entre l'orientation du coup et celle du mouvement. Elle établit même une certaine compensation qualitative entre la grandeur du coup et l'écart par rapport au mouvement initial. Elle se rappelle approximativement que la "limite" se situait à plus de 90 degrés du mouvement initial, mais elle ne se souvient pas que la valeur de l'écart était de 120 degrés. - *Même si ma grandeur est plus petite, la vitesse a augmenté... Maintenant, je donne un coup plus grand mais dans une orientation qui s'éloigne de celle du mouvement... la vitesse a diminué. Plus la vitesse est grande, plus ça va prendre du temps* (sous-entendu un grand écart) *avant qu'elle diminue. Plus le coup est petit, moins ça va prendre du temps.* - Ses explications sont sensiblement les mêmes à la séance 7.

ANA., Sec. III, Grpe 2 (séance 6) - Bien qu'elle ne se rappelle pas la valeur exacte de l'écart à partir duquel la vitesse diminue, elle parvient à expliquer les changements de vitesse en rapport avec la limite où la vitesse se conserve. - *À 45 degrés, elle augmente de la grandeur du coup. Là je l'ai mise plus proche de 45 que de 225* (c.à.d. Oi + 180). *Elle augmente mais de 15 seulement* (Gc est de 20). *Si je l'avais mise à 225, la vitesse se serait arrêtée. Il y a aussi une limite où, d'un côté, ça va toujours augmenter de plus en plus proche de 45 puis de l'autre côté, ça va toujours diminuer jusqu'à 225 degrés où elle s'arrête. Entre cela, ça augmente ou ça diminue et ces deux limites, c'est là où la vitesse ne changera pas.* - À travers ses manipulations, elle parvient toutefois à re-

trouver cette limite et elle différencie très bien les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale de ceux où elle est différente. - *Si la grandeur est plus grande que la vitesse... et si j'essaie de voir si 165 c'est encore la limite* (Oi est de 45), *ce ne sera pas ça la limite.* - Pourquoi ? - *Parce que le coup que je donne est plus gros, alors je me dis que l'écart qu'il va y avoir entre 45 et la limite va être encore plus grand... si j'avais donné une grandeur plus petite, ça aurait été le contraire.* - Elle tâtonne un peu plus à la séance 7, mais parvient quand même à reconstituer, à travers ses manipulations, la limite située à 120 degrés du mouvement initial.

NAD., Sec. III, Grpe 2 (séance 6) - Contrairement à CAM. et à ANA., elle se rappelle dès le départ que la limite se situait à 120 degrés du mouvement initial, lorsque la grandeur du coup était égale à la vitesse. - *Disons que je l'envoie à 120 degrés* (i.e. par rapport au mouvement initial), *avant ou après 45, elle va rester pareille. De là jusqu'à ce champ là, au 120 degrés, elle va augmenter et le 120 degrés qui reste, elle va diminuer.* - Est-ce qu'il y a une raison à cela ? - *Si je donne un coup qui est proche de son opposé elle va diminuer mais si je donne un coup qui reste assez proche, même si ce n'est pas trop proche, de l'orientation qu'elle a déjà, ça va quand même la faire augmenter.* - Est-ce que c'est tout le temps un champ de 120 degrés, quelle que soit la grandeur du coup ? - *Quand la grandeur du coup est plus grande que la vitesse, il y a un plus grand champ qui va faire que la vitesse augmente. Quand la grandeur est plus petite, ça va aller moins loin (soit l'écart), si je veux que ça augmente.* - On retrouve exactement le même type d'explication à la séance 7.

Ainsi, on peut constater que toutes les étudiantes de secondaire III ont progressé de la séance 1 à la séance 6. Partant d'un niveau d'indifférenciation complète des situations unidimensionnelles et bidimensionnelles, elles parviennent à différencier ces situations et la plupart d'entre elles arrivent à comprendre les relations qualitatives en jeu dans les changements de vitesse et d'orientation bidimensionnels. Bien que ces sujets n'utilisent à aucun moment la notion de vecteur, la compétence atteinte au terme de cette exploration reflète une certaine compréhension fonctionnelle et qualitative de l'idée de vecteur. Celle-ci se traduit par la capacité de différencier l'unidimensionnel et le bidimensionnel et de relier correctement les caractéristiques du coup à celles du mouvement initial dans l'anticipation des changements de vitesse et d'orientation, aussi bien bidimensionnels qu'unidimensionnels.

9.1.2 Sujets de secondaire V

Toutes les étudiantes de secondaire V, sauf une (HEL., Grpe 2) dont la démarche s'apparente beaucoup à celle des sujets de secondaire III, différenciaient explici-

tement les situations unidimensionnelles et bidimensionnelles, soit dès la première séance (CHA., Grpe 1), soit au début de la deuxième séance (CAR. et LUC., Grpe 1, MAR., Grpe 2) et sans aucune intervention de notre part. Aussi, l'exploration a-t-elle porté essentiellement sur les changements de vitesse et d'orientation dans les situations bidimensionnelles.

1/ Changements d'orientation bidimensionnels

Deux étudiantes (CHA. et CAM., Grpe 1) avaient, au départ, une représentation assez juste des effets du coup sur le changement d'orientation puisqu'elles se montraient capables d'effectuer de bonnes prévisions qualitatives. L'exploration semble avoir contribué à les amener à différencier plus clairement les cas les plus simples, où la grandeur du coup est égale à la vitesse, des cas plus complexes où, la grandeur du coup étant différente de la vitesse, on ne peut prédire l'orientation finale avec autant d'exactitude. C'est en référence à la moyenne qu'elles expliquent les changements d'orientation aux séances 6 et 7.

Séances 6 et 7

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 6) - Elle commence par distinguer explicitement les cas simples, où l'on est sur une dimension (situations unidimensionnelles), de ceux dans lesquels on doit tenir compte de davantage de facteurs. - *Quand on garde la même grandeur que la vitesse, on sait qu'on peut calculer l'orientation que notre balle va avoir... les deux facteurs influencent autant, alors ça va se situer dans le milieu de l'angle formé par l'orientation initiale et par celle du coup... Je me dis que si on a un coup qui est deux fois plus fort que la vitesse que j'ai déjà, ça devrait influencer deux fois plus, donc ça va rapprocher deux fois plus ma balle de l'orientation dans laquelle je donne le coup... c'est une question de rapport, à savoir de la vitesse que j'ai déjà par rapport à la vitesse que je donne et dans quel angle.* - Ses explications sont sensiblement les mêmes à la séance 7. - *Si on donne un coup dans une orientation, avec une grandeur égale à la vitesse, la différence* (i.e. écart) *entre Oc et Oi va être divisée par deux parce que les deux agissent autant l'un que l'autre, chacun tire autant de son côté... Tandis que si notre coup est plus grand que la vitesse, il va influencer plus, donc ça va rapprocher la balle vers son orientation... Je ne sais pas quel est le rapport exact, mais il y a une relation et je peux prévoir à peu près. Quand la grandeur est égale à la vitesse, on peut prévoir avec exactitude, on divise l'écart en deux.*

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 6) - *Lorsque j'ai un coup d'une grandeur égale à la vitesse de mon mouvement initial, l'orientation finale se trouve dans le milieu du mouvement initial et du coup.* - Elle explique correctement pourquoi on ne peut obtenir d'orientation finale à 90 degrés ou plus du mouvement initial en donnant un coup de même grandeur que la vitesse. - *... si j'ai un mouvement initial à 0 et que je veux obtenir une orientation finale à 120, il va falloir que je lui donne un coup à 240 et il n'ira pas*

de ce côté là (i.e. à 120), *il va aller dans les 300.* - On retrouve le même type d'explications à la séance 7. - *Si je suis à 90 degrés et que je veux que ma balle aille à 160 degrés... je ne peux pas. Si je donne un coup à 250 degrés, la balle va aller dans l'autre sens... Si je veux avoir un mouvement final à 90 degrés de mon mouvement initial, selon la théorie, il faudrait faire un écart de 90 de l'autre côté, mais si je lui donne un coup à 180, ma balle va s'arrêter. Donc ma limite serait une orientation finale de 89,9... degrés d'écart.*

Une autre étudiante, LUC., qui appliquait à toutes les situations un même raisonnement d'addition graphique des vecteurs, sans différenciation des cas simples ou complexes, continue, à la séance 7 comme à la séance 6, à privilégier ce type de raisonnement, ce qui donne parfois lieu à quelques tâtonnements. Cependant, à la séance 6, elle évoque l'impossibilité de modifier l'orientation de plus de 90 degrés, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse, et elle explique que le fait que "la balle va dans le milieu", quand on donne un coup de même grandeur que la vitesse, ne lui paraissait pas aussi évident auparavant, sauf dans les cas simples où l'orientation du coup est symétrique à celle du mouvement. Bien qu'elle continue à privilégier un raisonnement basé sur l'addition graphique des vecteurs, elle parvient toutefois à expliquer les changements d'orientation en référence à la moyenne, différenciant ainsi les cas simples des cas plus complexes.

De même, MAR. (Grpe 2) découvre, elle aussi, qu'on peut évaluer l'orientation finale avec exactitude quand la grandeur du coup est égale à la vitesse et qu'on peut la situer approximativement lorsqu'elle est différente.

Voici quelques extraits illustrant sa compréhension des changements d'orientation :

Séance 7

MAR., Sec. V, Grpe 2 (séance 7) - *Si ton coup est plus petit, il va moins être porté à aller vers l'orientation que tu donnes à ton coup, tandis que si ton coup est plus grand, il va plus être porté à aller vers l'orientation que tu donnes... C'est sûr que quand c'est dans le milieu, ça va bien, je divise par deux, mais quand le coup est plus petit ou plus grand, je peux prévoir seulement à peu près...*

Quant à HEL. (Grpe 2), les explications qu'elle fournit à la séance 6 reflètent les difficultés qu'elle a rencontrées dans l'exploration des changements d'orientation. Si sa compréhension des relations en jeu marque un net progrès par rapport à la séance un, puisqu'elle arrive à expliquer les changements d'orientation en référence à la moyenne, certaines situations demeurent encore problématiques (cas où l'écart entre Oi et Oc est supérieur à 180 degrés). Ces difficultés se retrouvent tant à la séance 6 qu'à la séance 7.

2/ Changements de vitesse bidimensionnels

Les progrès effectués par les sujets de secondaire V, au cours de leur exploration, se reflètent surtout dans leur compréhension des changements de vitesse, sauf pour HEL. (Grpe 2) avec laquelle ces derniers n'ont pu être suffisamment explorés. Bien que le raisonnement en termes de vecteurs leur permettait déjà d'effectuer des approximations qualitatives de la vitesse finale, le rôle de l'écart n'était pas aussi clair au début de l'exploration qu'il ne l'est au terme de celle-ci.

En effet, toutes les étudiantes de secondaire V évoquent spontanément, tant à la séance 7 qu'à la séance 6, l'écart de 120 degrés permettant de conserver au mouvement sa vitesse initiale lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse. Elles différencient également les cas où la grandeur du coup est égale à la vitesse initiale de ceux où elle est différente. Enfin, elles font le lien avec la représentation graphique des vecteurs en termes de triangles équilatéraux (quand Gc est égale à Vi) ou de triangles isocèles (quand Gc est différente de Vi).

Voici quelques extraits illustrant l'évocation des relations en jeu dans les changements de vitesse :

Séances 6 et 7

LUC., Sec. V, Grpe 1 (séance 6) - Elle évoque l'écart de 120 degrés mais commence par inverser les "champs" qui font augmenter ou diminuer la vitesse. - *Si je donne à 120 degrés juste, la vitesse va rester la même. Si je donne entre 0* (i.e. orientation initiale) *et 120, elle diminue.* - Pourquoi ? - *En vecteurs* (elle les dessine), *mettons que j'en un à 0 et que je lui en donne un de même grandeur à 45... ah non, je pense qu'elle augmente. Si elle augmente, ça veut dire que les 120 autres degrés, elle diminue.* - Elle essaie un écart de 100 puis corrige : *Les premiers 120 degrés, elle augmente, à 120 elle reste pareille, les 120 autres elle diminue puis les 120 autres, elle augmente encore...* - Elle précise qu'elle ne l'avait essayé que dans les cas où Gc = Vi et elle prévoit que cela va changer si elle donne un coup de grandeur supérieure à la vitesse. - *Je me dis que si je lui donne un coup dans une certaine direction, avec une grandeur plus grande que celle qu'elle a au départ, je vais être capable de retrouver ma grandeur de vitesse initiale* (soit Vf = Vi)... *Dans le fond, il faut quasiment trouver la valeur qui fait qu'elle reste identique puis faire un essai pour voir si en bas de cette valeur elle augmente et en haut elle diminue.* - À la séance 7, elle évoque encore l'écart de 120 degrés et elle fait le lien avec la représentation graphique de ses vecteurs, sous la forme d'un triangle équilatéral. Quand on lui demande ce que l'exploration lui a apporté, elle explique : *La plupart des choses dont je me suis aperçue, je ne les savais pas. Découvrir que les premiers 120 degrés d'écart, la vitesse augmente, à 120 elle reste pareille et les autres 120 elle diminue... une autre chose à laquelle je ne m'étais jamais arrêtée à penser c'est que, si mon mouvement initial est de 20 et que je donne un coup*

d'une autre grandeur, il y a seulement un angle qui va faire que ma résultante, ma vitesse finale, va être la même que la vitesse initiale. Je suis capable de faire les deux en faisant un triangle isocèle.

CAR., Sec. V, Grpe 1 (séance 6) - *J'ai découvert que si j'ai une vitesse initiale de x et que je lui donne un coup encore de x, quand je veux que mon mouvement final ait cette fameuse valeur de x, il faut que je fasse, pour l'orientation du coup, un écart de 120... puis j'ai le cas où mon coup a une grandeur plus grande que ma vitesse, mon écart de 120 degrés ne sera pas assez considérable pour que je conserve ma vitesse... le coup va être trop grand, il va nécessiter un plus grand écart... je me souviens qu'un coup de 30* (Vi est de 20) *faisait un écart dans les environ de 135, 140. Plus mon coup grandit en grandeur, plus l'écart nécessaire pour que ma vitesse finale soit égale à ma vitesse initiale va augmenter.* - On lui demande si elle a l'impression d'avoir appris quelque chose au cours de son exploration. - *Le meilleur exemple, c'est l'écart de 120 degrés. Je n'y aurais jamais pensé. On le découvre au fur et à mesure qu'on expérimente, qu'on se pose des questions et qu'on essaie de prévoir nos coups... puis, lorsque la grandeur du coup est égale à la vitesse, la notion d'écart divisé par deux, ce n'est pas évident sur une feuille sauf dans le cas simple où on a un écart de 90 degrés.* - Elle établit encore les mêmes relations à la séance 7.

CHA., Sec. V, Grpe 1 (séance 6) - Elle évoque, elle aussi, le 120 degrés d'écart, permettant de conserver la vitesse initiale, qu'elle relie à un triangle équilatéral. Lorsqu'on lui demande si cette exploration lui a apporté quelque chose, elle explique : ... *l'écart de 120 degrés à partir duquel la vitesse diminue, sans le faire avec l'ordinateur, sans pouvoir le vérifier, j'aurais mis plus de temps à comprendre.* - À la séance 7, elle revient sur l'écart de 120 degrés qui permet de conserver au mouvement sa vitesse initiale. - *Il y avait une petite "valeur clé" que j'avais mis bien du temps à trouver, je m'en suis souvenue, c'est le 120 degrés. Disons que j'ai une vitesse de 20 et que je donne un coup de grandeur 20, quelle orientation je dois donner pour que ma vitesse finale soit de 20 ? C'était le 120 degrés et ça s'explique assez facilement quand on pense à un triangle équilatéral. C'est-à-dire que si on regarde nos trois côtés, qui sont de la même grandeur* (soit, Vi, Gc et Vf), *il faut que nos trois angles soient égaux si nos trois côtés sont égaux. Donc, la petite "valeur magique" si je peux dire, c'est 120, c'est un peu comme diviser mon quadrant. Il y a ma zone de 120 degrés, soit 60 degrés de part et d'autre de l'opposé, quand on donne des coups dans cette zone là, la vitesse diminue. On conçoit que c'est en sens contraire du mouvement, ça n'aide pas à pousser la balle, tandis que toute l'autre zone ici* (soit 120 degrés de part et d'autre de Oi), *ça va augmenter la vitesse.*

L'écart de 120 degrés est apparu à ces étudiantes comme une véritable "découverte". Par ailleurs, cette représentation des changements de vitesse, en termes d'écart plus ou moins important par rapport au mouvement initial et de "limite" permettant de conserver la vitesse de départ, leur a permis de raffiner leur représentation des chan-

gements de vitesse et de donner un nouveau sens à la notion de vecteurs qu'elles avaient formellement apprise. La mise en relation des notions d'écart, de vecteurs et de triangles leur permet en effet d'unifier des représentations qui demeuraient antérieurement dissociées. Si les sujets les plus compétents ne vont pas jusqu'à établir de relations quantitatives précises, ils supposent néanmoins que ces relations existent et qu'elles permettraient d'évaluer la vitesse finale avec précision, dans tous les cas. Ainsi, CAR. (Sec. V, Grpe 1) fait effectivement l'hypothèse qu'*"il doit y avoir une relation mathématique précise qui relie cela suivant la grandeur du coup... mais il faudrait faire des expériences pour la trouver"*.

Au terme de cette exploration, axée essentiellement sur la découverte de relations qualitatives, ces sujets prennent davantage conscience à la fois de l'intérêt et des limites du raisonnement qualitatif. Ceci leur permet de réaliser l'utilité d'avoir recours, dans certaines situations, à des "relations mathématiques" permettant d'effectuer des calculs plus précis, et de donner un sens à l'utilisation de tels outils. On peut même supposer qu'en poursuivant leur exploration, certains sujets auraient pu se rapprocher encore davantage du raisonnement quantitatif et redécouvrir, en quelque sorte par eux-mêmes, certains algorithmes qui font souvent l'objet de ce que Papert qualifie d'"apprentissage dissocié".

Résumé

On peut considérer, à la lumière des conduites observées aux séances 6 et 7, que toutes les étudiantes de secondaire V, sauf une (HEL., Grpe 2) et trois étudiantes de secondaire III sur 5 (soit, NAD., ANA. et CAM.), ont acquis une bonne compréhension des changements de vitesse et d'orientation dans les situations unidimensionnelles. HEL. (Sec. V, Grpe 2) n'a qu'une compréhension partielle des changements d'orientation, puisque l'évaluation de l'orientation finale lui pose encore des difficultés dans certaines situations, et elle ne manifeste qu'un début de compréhension des changements de vitesse, sans mise en relation explicite avec les changments de vitesse dans les situations unidimensionnelles et sans différenciation et mise en relation du rôle de l'écart avec celui de la grandeur.

Pour ce qui est des autres sujets de secondaire III (MAP. et MAT., Grpe 1), MAP. a une bonne compréhension des changements d'orientation mais les changements de vitesse demeurent incompris, sans aucune intuition, apparemment, du rôle de l'écart, basé sur la capacité de mettre en relation certaines situations unidimensionnelles. MAT. (Grpe 1) a une compréhension des changements d'orientation plus lacunaire que celle de MAP. Par contre, elle manifeste un début de compréhension des changements de vitesse en relation avec l'écart entre l'orientation du coup et celle du mouvement.

On peut schématiser, comme suit, les niveaux empiriquement observés aux séances 6 et 7 en relation avec la compréhension des situations unidimensionnelles et la

compréhension des changements d'orientation puis des changements de vitesse dans les situations bidimensionnelles.

Situations unidimensionnelles

Elles sont comprises par tous les sujets (sec. III et Sec. V). Il n'y a donc qu'un seul niveau, celui de la compréhension, se manifestant par :

- la capacité de prévoir l'effet d'un coup de Oc = Oi;
- la capacité de prévoir l'effet d'un coup de Oc = 0i + 180;
- la différenciation des situations unidimensionnelles par rapport aux situations bidimensionnelles.

Changements d'orientation bidimensionnels

On peut distinguer empiriquement trois grands niveaux dans la compréhension des changements d'orientation bidimensionnels. Ces niveaux sont les suivants :

Premier niveau

Il correspond à une compréhension partielle des changements d'orientation, se manifestant par :

- la capacité de prévoir Of quand Gc = Vi;
- la différenciation des cas où Gc = Vi et de ceux où Gc est différente de Vi;
- une difficulté à évaluer correctement Of dans les situations conflictuelles où Gc = Vi et l'écart entre Oi et Oc est égal ou supérieur à 180 degrés.

C'est à ce niveau que se situent deux étudiantes, l'une de sec. III (MAT.), l'autre de sec. V (HEL.)

Second niveau

Il correspond à une compréhension complète des changements d'orientation en référence à la moyenne, se traduisant par :

- la capacité de prévoir l'orientation finale avec précision quand Gc = Vi et approximativement quand Gc est différente de Vi;
- la capacité d'évaluer correctement Of dans les situations conflictuelles où Gc = Vi et l'écart entre Oi et Oc est égal ou supérieur à 180 degrés.

C'est à ce niveau que se situent les 4 autres étudiantes de sec. III.

Troisième niveau

Il s'apparente au précédent, puisqu'il correspond à une compréhension complète des changements d'orientation en référence à la moyenne, mais avec en plus un lien avec la représentation graphique des vecteurs.

C'est à ce niveau que se situent 4 étudiantes de sec. V.

La figure suivante (Figure 19) permet de visualiser le nombre de sujets de chacun des deux groupes (secondaire III et secondaire V), que l'on retrouve à l'un ou l'autre de ces trois niveaux.

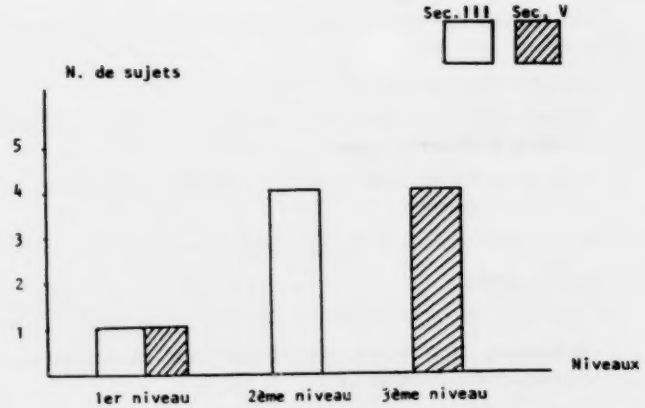


Figure 19

Niveaux observés chez les Sec.III et

chez les Sec.V en relation avec le schème de la Moyenne

(Séances 6 et 7)

Changements de vitesse bidimensionnels

Les données recueillies nous amènent à différencier empiriquement 5 niveaux caractérisant la compréhension des changements de vitesse dans les situations bidimensionnelles. Ces niveaux sont les suivants :

Premier niveau

Il reflète une incompréhension des relations en jeu, se manifestant par :

- l'incapacité de prévoir que la vitesse puisse diminuer sauf dans les cas où Oc = Oi + 180 degrés.
- l'absence de raisonnement en termes d'écart.

Ce niveau caractérise la compétence d'une étudiante de sec. III, MAP.

Second niveau

Il correspond à une ébauche de compréhension qualitative des changements de vitesse, se traduisant par :

- une intuition globale du rôle de l'écart;
- aucune relation explicite avec les changements de vitesse dans les situations unidimensionnelles;
- un défaut de différenciation et de mise en relation du rôle de l'écart avec celui de la grandeur.

C'est à ce niveau que se situe une étudiante de sec. V, HEL.

Troisième niveau

Il reflète une intuition plus articulée du rôle de l'écart, se manifestant par :

- l'établissement d'un lien avec les changements de vitesse dans les situations unidimensionnelles;
- la recherche d'une limite à 90 degrés du mouvement initial;
- l'absence de différenciation et de mise en relation explicites du rôle de l'écart avec celui de la grandeur.

Une étudiante de sec. III, MAT., se situe à ce niveau.

Quatrième niveau

Il correspond à une compréhension qualitative précise du rôle de l'écart, se traduisant par :

- la reconstitution de la limite de 120 degrés quand Gc = Vi;

- la différenciation et la mise en relation du rôle de l'écart avec celui de la grandeur (i.e. la limite sera différente si Gc n'est pas égale à Vi).

Trois étudiantes de sec. III se situent à ce niveau.

Cinquième niveau

Il est identique au précédent, si ce n'est qu'il comporte, en plus :

- l'établissement d'un lien explicite avec la représentation graphique des vecteurs (triangles équilatéraux et triangles isocèles).

Ce niveau caractérise la compétence atteinte par quatre étudiantes de secondaire V.

La figure suivante (Figure 20) illustre le nombre de sujets de chacun des deux groupes que l'on retrouve à ces différents niveaux.

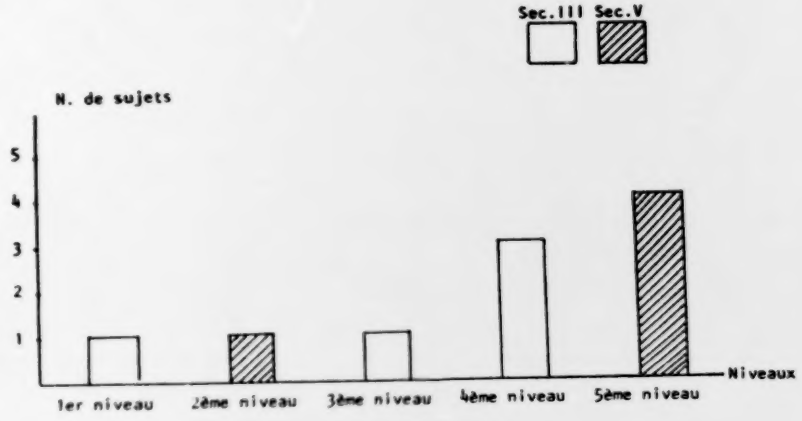


Figure 20

Niveaux observés chez les Sec.III et

chez les Sec. V en relation avec le schème de l'écart

(Séances 6 et 7)

CONCLUSION

When we ask ourselves where people get the funny ideas they have, we must, like Piaget , look to experience - not just experience as judged from an abstract view of what people are doing, but as felt internally, as judged by the extent to which people discern structure in the experience, and to the extent that this structure is contributing to the development of new mental structures. The key here is continuity. We cannot expect to have students learn things radically distant from their current state of understanding. Nor will they learn things that have the character, such as the extremely systematic view of the mechanical universe provided by Newton, expect by progressing through stages of understanding that, by degrees, approximate the final state.

diSessa, 1988, p. 61

So the crucial things about making discovery part of mathematics education include not only the material we provide and the activities that we suggest in the short run, but as much or more the long term perspective on learning that we foster.

diSessa, 1986, p. 217

Pour conclure, nous présenterons d'abord un résumé de notre démarche en décrivant brièvement comment, à partir d'un cadre conceptuel inspiré à la fois de la psychologie cognitive, de la psychologie du développement et de quelques travaux en intelligence artificielle, nous avons été amenée à concevoir un environnement d'apprentissage basé sur l'ordinateur et à élaborer une analyse de tâche d'un point de vue théorique. Nous rappellerons ensuite les points saillants qui ressortent des résultats de l'analyse empirique. Enfin, nous essaierons de situer notre démarche à l'intérieur d'une perspective pédagogique plus large en nous interrogeant sur le rôle de l'intervenant, dans le processus d'exploration du micromonde, et sur les implications de notre analyse au niveau de l'enseignement.

Notre recherche poursuit essentiellement deux grands objectifs. Le premier consiste à proposer un modèle d'analyse de tâche, du point de vue de la compétence, qui permette de tenir compte à la fois de la nature et de la complexité des connaissances visées et de ce que peut représenter pour l'apprenant l'acquisition de ces connaissances. Le second consiste à illustrer, à l'aide d'un exemple dans le domaine de la physique, l'apport des micromondes comme "matériaux d'apprentissage" dans le contexte d'une intervention basée sur une conception interactive et constructive de l'acquisition de connaissances.

Dans la première partie, nous avons présenté le cadre conceptuel qui a inspiré notre recherche. Nous avons constaté que, dans le contexte actuel de l'analyse de tâche fondée sur la psychologie cognitive, la compétence est envisagée dans une perspective essentiellement constructiviste. Cette dernière présente des implications importantes au niveau de l'apprentissage et de l'enseignement. En effet, si l'on veut pouvoir s'appuyer sur ce type d'analyse pour identifier les objectifs de l'enseignement et faciliter éventuellement l'apprentissage, il importe de disposer de modèles de représentation des connaissances qui tiennent compte, non seulement des connaissances visées, mais également des représentations intuitives utilisées par l'apprenant et de l'impact que ces connaissances préalables peuvent avoir au niveau de l'apprentissage. Aussi avons-nous cherché à définir un certain modèle d'analyse de la compétence pouvant guider l'intervention pédagogique en nous aidant à mieux cerner, d'une part, la nature des connaissances dont on veut faciliter l'acquisition et, d'autre part, la façon dont ces connaissances peuvent se construire chez l'apprenant à partir de l'interaction entre les représentations initiales du sujet et un environnement d'apprentissage adapté à son niveau de compétence.

Nous appuyant à la fois sur la théorie de l'équilibration de Piaget et sur un certain nombre de travaux en intelligence artificielle, nous avons proposé un modèle d'analyse de la compétence en termes de schèmes et de processus d'équilibration intervenant dans la construction de ces schèmes. Ce modèle d'analyse de la compétence repose sur deux idées centrales :

- celle de l'existence d'une certaine continuité entre divers niveaux de compétence et, notamment, entre la connaissance intuitive et une connaissance davantage formalisée;

- celle d'un changement qualitatif, en particulier au niveau de l'organisation des connaissances entre elles, dans le passage d'un niveau de compétence à un autre.

Une conception à la fois interactive et constructive de l'acquisition de connaissances conduit à accorder à l'environnement un rôle de support essentiel à l'apprentissage. Aussi, nous sommes-nous demandée comment on pouvait faciliter l'apprentissage en intervenant au niveau de l'environnement servant de support à cet apprentissage. En nous appuyant plus particulièrement sur les travaux de diSessa, Lawler, Minsky et Papert, nous avons cherché à préciser l'apport des micromondes artificiels en tant que "support expérientiel" à l'apprentissage. Les micromondes nous ont paru présenter une double caratéristique qui en fait des outils privilégiés pour faciliter

l'acquisition de connaissances : ils sont conçus de manière à être suffisamment en accord avec les connaissances préalables de l'apprenant pour lui permettre d'interagir avec eux; par ailleurs, la façon dont ils sont structurés permet à l'apprenant de dépasser ses connaissances préalables dans le sens de la formalisation et de la systématisation. Nous avons donc tenté d'illustrer, à l'aide d'un exemple dans le domaine de la physique, l'apport des micromondes comme matériaux d'apprentissage dans un contexte d'intervention basé sur une conception à la fois interactive et constructive de l'acquisition de connaissances.

Dans la seconde partie de notre recherche, après avoir décrit le micromonde de mouvement que nous avions conçu, nous avons proposé une analyse théorique des éléments de connaissance impliqués. Cette analyse, en termes de schèmes, avait essentiellement pour but de fournir une représentation de la compétence associée à la tâche (exploration du micromonde) sous une forme qui permette éventuellement d'en faciliter l'acquisition. Deux dimensions centrales se dégagent de notre analyse :

- le caractère modulaire ou décomposable de la compétence : il se traduit par un ensemble de schèmes distincts, mais interreliés, qui peuvent donner lieu à des constructions successives, permettant ainsi une acquisition progressive de la compétence;

- le caractère qualitatif et fonctionnel de la compétence visée : il se traduit par le fait que les schèmes identifiés sont basés sur des *idées puissantes* (i.e. simples et généralisables), pouvant servir de "pont" entre les connaissances préalables de l'apprenant et celles que l'on a pour but de lui faire acquérir.

Cette analyse théorique devait permettre de guider l'intervention en nous aidant à mieux cerner la nature des connaissances visées et ce que peut représenter pour l'apprenant l'acquisition de ces connaissances. Nous nous sommes donc basée sur cette analyse pour élaborer un scénario d'intervention (troisième partie). Ce dernier était précisément conçu de façon à amener un certain nombre de sujets à (re)construire progressivement, par approximations successives, les principaux schèmes reliés à la compétence visée

Dans la perspective constructiviste qui est la nôtre, il importait de concevoir une tâche, non seulement en fonction de sa structure, mais aussi en fonction des caractéristiques des élèves auxquels elle s'adresse. L'analyse de tâche se devait donc d'inclure une analyse des interactions possibles entre les caractéristiques de la tâche et les connaissances antérieures que possèdent des sujets qui interagissent avec la tâche.

C'est pourquoi nous avons proposé une analyse empirique de l'acquisition de ces connaissances chez deux groupes d'élèves de niveaux secondaire (quatrième partie). Il s'agissait en fait de créer une situation expérimentale permettant de voir dans quelle mesure les éléments de connaissance que nous avions préalablement identifiés apparaissaient chez les sujets et de quelle façon ils se manifestaient au cours de l'interaction. Nous avons donc observé, puis analysé, comment des sujets de différents niveaux (secondaire III et secondaire V) parvenaient à progresser dans ce contexte, c'est-à-dire à passer d'un niveau de compétence à un autre, et quels étaient les principaux processus d'équilibration en jeu dans le passage d'une étape de construction à la suivante. L'analyse empirique consistait donc essentiellement à ajouter, à la description préalable de la compétence en termes de schèmes (analyse théorique), des informations sur ce que peut représenter l'acquisition progressive de ces schèmes pour des sujets d'un certain niveau. Voyons maintenant ce que les résultats de cette analyse empirique nous ont permis de mettre en évidence.

Notons tout d'abord que l'exploration du micromonde s'est avérée une activité d'apprentissage significative, tant pour les étudiantes de secondaire III, qui n'avaient jamais fait de physique, que pour les étudiantes de secondaire V qui possédaient déjà certaines connaissances à propos des vecteurs. L'analyse de la démarche des sujets, dans chacun des deux groupes, nous a permis de constater que toutes les étudiantes avaient amélioré leur compréhension des effets de la force sur le mouvement de la balle, à travers leur exploration du micromonde, en dépit de différences interindividuelles dans le degré de raffinement des connaissances acquises. Par ailleurs, les connaissances acquises à travers cette exploration montrent qu'il n'est nullement nécessaire de posséder une connaissance formelle de la notion de vecteur pour parvenir à contrôler le mouvement de la balle ou pour se construire une représentation qualitative adéquate des effets de la force sur le mouvement.

Comme l'illustre bien la démarche d'apprentissage des sujets, les divers schèmes que nous avions préalablement identifiés se construisent par étapes. Chacune de ces étapes peut donner lieu à des déséquilibres et à des rééquilibrations partielles, puisque les sujets ne rencontrent pas nécessairement tous les mêmes obstacles et qu'ils peuvent éprouver plus ou moins de difficultés à les surmonter. Il existe néanmoins une progression nécessaire. Ainsi, la compréhension des situations unidimensionnelles précède la compréhension des situations bidimensionnelles et en constitue même le point de départ. De même, la capacité d'identifier les "cas simples", dans lesquels on peut facilement effectuer des évaluations quantitatives précises (ex. : moyenne, écart de 120

degrés), va servir de base à la compréhension qualitative des situations qui s'avèrent nettement plus difficiles à quantifier. Certaines situations spécifiques, bien que redondantes d'un point de vue strictement formel (par exemple : situation unidimensionnelle où "la balle s'arrête", situations où la balle conserve sa vitesse tout en modifiant son orientation, etc.), vont en effet jouer un rôle important dans l'évocation et la mise en relation d'éléments de connaissances pertinents. L'analyse de la démarche d'exploration des sujets nous a amenée à mettre davantage en évidence le rôle central que joue, dans l'acquisition progressive de la compétence, la capacité d'identifier les cas les plus simples, de raisonner à partir de ceux-ci, et de se construire d'abord une représentation qualitative des phénomènes, avant de chercher à les quantifier de façon plus précise. On comprend mieux ainsi en quoi la structuration logique des relations en jeu s'avère préalable à l'introduction d'algorithmes permettant de faire des calculs précis.

L'interaction des sujets avec des problèmes ou situations variées, aux différentes phases d'exploration du micromonde, nous a permis d'illustrer la façon dont les schèmes se construisent à partir des connaissances préalables de l'apprenant, se raffinent et s'articulent progressivement à travers leur utilisation. Cette construction prend la forme d'une rééquilibration liée à la nécessité de surmonter les obstacles que génère, dans les représentations initiales de l'apprenant, leur confrontation avec différentes situations. Elle révèle une certaine continuité entre les représentations intuitives, fragmentées et plus ou moins bien articulées, que les sujets font spontanément intervenir, et les connaissances que l'on a pour but de leur faire acquérir. Les représentations partielles, les concepts simples, tout approximatifs soient-ils, jouent en effet un rôle important dans l'acquisition de la compétence puisqu'ils servent précisément de base à l'édification de connaissances plus complexes. Dans un tel contexte d'apprentissage, les préalables ne sont donc pas d'ordre "formel", mais plutôt d'ordre "expérientiel", et il existe une étroite relation entre la réussite pratique et la compréhension conceptuelle, la seconde procédant d'une "réflexion", au sens piagétien du terme, sur la première.

La construction progressive des divers schèmes apparaît ainsi comme un processus de rectification progressive d'hypothèses, de stratégies, de modèles ou de représentations simplifiées, ou même, partiellement incorrectes. Ce processus consiste à passer d'un niveau de compréhension à un autre en rectifiant, modifiant, différenciant et coordonnant, etc., les connaissances caractérisant les niveaux antérieurs. Un tel processus de construction n'est nullement linéaire mais dialectique. Il importe, en effet, de distinguer la construction d'un schème et son raffinement. Une fois le schème construit, et par conséqeunt utilisable, il devient modifiable du fait même de son utilisation. Il peut se

différencier à travers ses applications variées, entrer en relation avec d'autres éléments de connaissance par rapport auxquels il était antérieurement dissocié. C'est ainsi que chacun des schèmes construits devient en quelque sorte le point de départ des schèmes qui vont s'élaborer par la suite, mais ces constructions ultérieures modifient en retour les schèmes qui les ont rendues possibles en les intégrant à une structure plus large. L'apprentissage s'insère donc dans une dynamique interactive, source de modifications continuelles dans les représentations initiales de l'apprenant. Celles-ci se reflètent dans la façon dont les sujets interagissent avec le micromonde, aux différentes phases de l'exploration. En effet, dans la mesure où les connaissances évoluent à travers leur utilisation, elles transforment, par le fait même, la nature des interactions possibles avec le micromonde. C'est ainsi que ce qui n'était pas "observable", à un certain niveau, parce que le sujet ne disposait pas de représentations appropriées ("coordinations") pour interpréter certains éléments d'information, le devient à une étape ultérieure ("équilibration").

La différence essentielle entre les étudiantes de secondaire III et celles de secondaire V réside davantage dans la nature des connaissances préalables auxquelles elles font appel que dans la démarche d'exploration et d'apprentissage. Presque toutes les étudiantes de secondaire V différencient dès le début les situations unidimensionnelles et bidimensionnelles et évoquent le schème d'addition graphique des vecteurs ou, du moins, certains éléments de connaissance à propos des vecteurs. Ceux-ci leur permettent de faire des anticipations qui ne sont pas accessibles aux sujets de secondaire III. Toutefois, si le fait de posséder des connaissances relatives aux vecteurs semble, à première vue, susceptible de faciliter l'apprentissage, ce n'est pas toujours nécéssairement le cas. On constate en effet que certains sujets éprouvent de la difficulté à utiliser ces éléments de connaissance de façon appropriée dans plusieurs situations et que la représentation vectorielle qu'ils utilisent a parfois pour effet de les amener à complexifier des situations relativement simples. Ces déséquilibres, rencontrés chez quelques étudiantes de secondaire V, permettent de faire ressortir une distinction, à notre avis essentielle, entre la connaissance "formelle" de la notion de vecteur et la capacité de l'utiliser de façon appropriée dans un contexte où elle s'avère fonctionnelle. L'interaction avec le micromonde a constitué, pour ces étudiantes, un "contexte d'utilisation" d'une notion qu'elles avaient "formellement" apprise. Ceci leur a permis de préciser et d'enrichir leurs représentations initiales. Par ailleurs, les divers schèmes que nous les amenons à reconstruire ne sont nullement "redondants" par rapport aux représentations que ces sujets évoquent. D'une part, ils sont davantage axés sur la représentation qualitative des phénomènes que sur leur quantification précise. D'autre part, chaque schème reflète une

façon particulière de décrire une situation et de raisonner sur elle. Ces descriptions correspondent en quelque sorte à des "perspectives variées", des façons différentes de "voir les choses", de les envisager sous un certain angle, notamment en liaison étroite avec les connaissances que les sujets possèdent déjà. Chacune de ces descriptions présente en outre la caractéristique de faire ressortir certains aspects plutôt que d'autres si bien que la mise en relation de ces descriptions ou représentations variées conduit à leur enrichissement mutuel.

Enfin, on constate que, si certains "obstacles" paraissent davantage spécifiques à quelques sujets, d'autres (ex. : limite à 90 degrés de Oi) se retrouvent chez presque tous et reflètent les étapes inhérentes à la découverte et à l'articulation progressives des divers éléments de connaissance constitutifs de chacun des schèmes. Ces types d'obstacles variés, qu'il est nécessaire de surmonter pour parvenir à la compétence, nous renseignent sur la variété des éléments et processus de connaissance de divers niveaux que suppose l'utilisation appropriée d'un schème. Ces éléments de connaissance sont souvent imperceptibles chez le sujet compétent parce qu'ils ont acquis pour lui le statut d'"évidences" et qu'ils prennent alors la forme de "connaissances implicites". L'analyse empirique de la tâche s'avère, à cet égard, extrêmenent utile puisque, en confrontant à un même problème ou à une même situation des sujets de divers niveaux de compétence, elle conduit à identifier, non seulement ce qui peut constituer un obstacle, mais également pour 'qui' cela peut être un obstacle. Par ailleurs, elle permet de distinguer les difficultés inhérentes à la tâche, qui peuvent parfois nécessiter des "sauts" dans la compréhension, des véritables "obstacles épistémologiques" (Vergnaud, 1989b), liés au fait que les connaissances à acquérir contredisent les connaissances préalables du sujet.

L'analyse de tâche que nous avons proposée s'avère ainsi très différente d'une analyse de type logique ou formel. Non seulement elle tente de fournir une description "fonctionnelle" de la représentation qu'un sujet compétent peut se donner de la tâche, mais elle inclut également des considérations explicites sur ce que peut représenter, pour des sujets d'un certain niveau, l'acquisition progressive de cette compétence. Elle apporte de ce fait plusieurs considérations qui peuvent être utiles à l'enseignant. D'une part, elle permet de mettre en évidence un certain nombre d'obstacles à l'apprentissage, qui ne sont pas perceptibles chez le sujet compétent. D'autre part, elle contribue à identifier, dans les représentations initiales de l'apprenant, celles qui peuvent constituer des obstacles éventuels et celles qui, au contraire, peuvent servir de "pont" pour faciliter le passage d'un niveau de compétence à un autre. Par ailleurs, elle aide à

comprendre les types d'erreurs que font les sujets en tant qu'expression des difficultés qu'ils éprouvent à construire certaines notions, à relier des éléments d'informations nouveaux avec des connaissances déjè acquises. L'identification de ces représentations spontanées et de leur rôle facilitateur ou perturbateur, dans l'apprentissage, peut guider l'enseignant tant au niveau des objectifs d'apprentissage visés qu'à celui des moyens d'intervention utilisés pour faciliter l'apprentissage.

Précisons enfin que l'analyse que nous avons effectuée ne se prétend nullement exhaustive. Elle s'insère en effet dans une perspective de recherche plus large où il s'agit essentiellement d'acquérir une connaissance plus approfondie de la compétence reliée à un "champ conceptuel", en identifiant comment des sujets d'un certain niveau interagissent avec un certain environnement, se rattachant à un champ conceptuel déterminé. Cet environnement d'apprentissage ne constitue donc qu'une petite partie d'un environnement conceptuel beaucoup plus large et il présente des limites inhérentes à sa définition même. S'il contribue à faciliter la construction de concepts, pour des sujets d'un certain niveau, il va de soi que nous ne prétendons nullement qu'il est suffisant. Pour reprendre une expression de Lawler (1985) pour qu'il y ait un peu d'apprentissage il faut qu'il y ait beaucoup d'expériences. Le micromonde que nous avons conçu ne constitue qu'un contexte d'expériences parmi d'autres. On pourrait en effet concevoir, en rapport avec le même champ conceptuel, d'autres micromondes de mouvements incarnant des aspects plus ou moins complexes des lois du mouvement. On pourrait également faire interagir des sujets présentant des niveaux de compétence initiale totalement différents de ceux de nos sujets. On serait alors amené à se poser des questions comme celle-ci par exemple

Si je veux faciliter la compréhension de certains aspects des lois du mouvement à des élèves de 5ème année, quel type d'environnement vais-je leur proposer, comment vais-je caractériser cet environnement et de quelle façon vais-je l'utiliser avec ces élèves ?

On peut considérer, d'une certaine manière, qu'une analyse de tâche n'est jamais totalement achevée. Sa fonction est tout à fait analogue au processus de construction de connaissances que nous avons cherché à décrire. Elle consiste à générer des représentations de la compétence (schèmes) puis à les rectifier ou à les ajuster, à partir de données empiriques. Il convient en effet d'envisager une alternance de l'analyse théorique et de l'analyse empirique : la première guide la seconde et cette dernière contribue à modifier en retour l'analyse théorique, c'est-à-dire à la préciser et à

l'enrichir, ce qui permet de générer de nouvelles analyses empiriques. C'est ainsi que les processus interactifs et constructifs que nous avons tenté de décrire et d'analyser, dans le contexte d'une analyse de tâche effectuée d'un double point de vue théorique et empirique, se retrouvent à un niveau en quelque sorte "métacognitif", dans notre démarche de recherche elle-même, puisqu'elle constitue, elle aussi, un processus d'acquisition de connaissances.

Nous nous pencherons maintenant sur le rôle de l'intervenant, dans la démarche d'exploration du micromonde, et nous tenterons de dégager les implications pédagogiques de notre analyse, en ce qui a trait plus particulièrement au rôle de l'enseignant dans le processus d'apprentissage. Rappelons d'abord que notre objectif n'était pas de développer une "méthode d'enseignement", mais de caractériser les "transformations cognitives" (processus de construction et de modification de schèmes) en jeu dans l'acquisition de la compétence, chez des sujets qui interagissent avec le micromonde. Nous avons, en effet, considéré l'apprentissage comme un processus essentiellement auto-constructeur (équilibration), consistant à modifier des représentations ou schèmes initiaux, à travers leur utilisation, de façon à permettre l'intégration de nouveaux éléments d'information. Le "moteur" de cette construction réside toutefois dans les interactions qui peuvent se produire entre les connaissances évoquées par le sujet et les situations en fonction desquelles elles le sont. C'est pourquoi nous avons insisté tout particulièrement sur le rôle de l'environnement (micromonde) en tant que support à l'apprentissage. Il reste maintenant à préciser le "statut" des interventions, dans ce contexte, c'est-à-dire dans quelle mesure elles ont pu contribuer, elles aussi, au processus d'apprentissage.

Si le micromonde, en tant que "contexte interactif", fournit un support expérientiel, essentiel à l'apprentissage, on peut toutefois se demander dans quelle mesure l'interaction, à elle seule, aurait été suffisante. On constate en effet qu'elle n'est génératrice d'apprentissage que dans la mesure où les sujets ne sont pas confrontés à des déséquilibres trop grands et qu'ils disposent de suffisamment d'éléments de connaissance pertinents pour parvenir à surmonter ces déséquilibres. Or, c'est précisément à ce niveau que l'intervention trouve sa justification. Son rôle est d'alimenter et d'exploiter les processus d'équilibration inhérents à l'apprentissage de manière à ce que les sujets soient confrontés à des déséquilibres appropriés à leur niveau de compétence et qu'ils puissent trouver des stratégies pour se rééquilibrer, c'est-à-dire intégrer à leurs représentations initiales de nouveaux éléments d'information. On peut supposer que le sujet qui reste trop longtemps en déséquilibre risque de "démissionner" parce qu'il perçoit la tâche

comme "trop complexe" pour lui. Inversement, le sujet qui s'en tient aux situations qu'il maîtrise bien a peu de chance d'exploiter les richesses de l'environnement qui lui est proposé. Ces états de déséquilibre ou d'équilibre trop persistents évoquent alors un phénomène de "clôture" (Léonard, 1979), c'est-à-dire que le processus d'équilibration en cours dans une situation d'apprentissage ou de résolution de problème s'interrompt avant d'être parvenu à son terme. Le rôle de l'intervention, dans le processus d'exploration, consiste alors précisément à alimenter la dynamique de l'équilibration de façon à éviter l'apparition d'un phénomène de "clôture". Nous constatons qu'il repose sur la complémentarité constante des aspects de diagnostic et d'intervention.

Les résultats de l'analyse empirique font clairement ressortir l'impact des connaissances préalables de l'apprenant, dans le processus d'apprentissage, et la nécessité d'en tenir compte au niveau de l'intervention. L'apprentissage ne peut prendre place que dans la mesure où le sujet parvient à relier ce qui est nouveau à ce qui est déjà connu. Cela n'implique certes pas que les connaissances préalables des sujets aient toujours un rôle facilitateur. Si certaines d'entre elles sont pertinentes et peuvent constituer un point de contact entre ce que le sujet sait déjà et les connaissances que l'on tente de lui faire acquérir, d'autres au contraire viennent faire obstacle. Un aspect central de l'intervention va donc consister, précisément, à amener le sujet à reconnaître et à utiliser convenablement les éléments de connaissance pertinents et à trouver des stratégies appropriées pour surmonter les déséquilibres que génère l'utilisation de représentations plus ou moins appropriées.

L'analyse de la démarche des sujets nous a permis d'identifier plusieurs sources de déséquilibres. Un déséquilibre peut naître de l'absence de représentation appropriée, mais aussi de l'utilisation plus ou moins appropriée d'une représentation pourtant correcte, ou encore d'un conflit entre deux représentations distinctes s'appliquant à une même situation. Il y a alors "compétition" là où il devrait y avoir "compromis". Or, on constate que ces déséquilibres variés, qui traduisent l'état du système de connaissances face à une situation que le sujet ne parvient pas à comprendre ou à assimiler, à l'aide des schèmes ou représentations dont il dispose, ont un caractère essentiellement relatif. Ils dépendent à la fois des connaissances évoquées par le sujet et des situations en fonction desquelles elles le sont. Il s'ensuit qu'une situation n'est jamais perturbatrice en elle-même, mais est perçue comme perturbatrice, ou ne l'est pas, selon les éléments de connaissances, déjà ou non, acquis par le sujet. Le micromonde constitue, à cet égard, non seulement un outil d'apprentissage pour l'apprenant, mais un outil de "diagnostic" pour l'intervenant, puisqu'il permet de créer des situations qui

"extériorisent" les conflits éventuels liés à l'utilisation, par le sujet, de ses connaissances préalables. Ce sont en effet, les conduites spontanées du sujet qui, en tant qu'"observables" pour l'intervenant, vont guider ce dernier dans le choix des interventions à effectuer, soit pour induire des déséquilibres soit, au contraire, pour aider le sujet à surmonter un déséquilibre.

Le caractère approprié ou non d'une intervention dépend donc des connaissances dont dispose le sujet pour assimiler l'information. Puisque ce sont les situations variées auxquelles le sujet se trouve confronté qui servent de support à la construction, à la différenciation et à la coordination progressives des divers schèmes, l'une des principales fonctions de l'intervention est justement de favoriser la rencontre avec ces situations, aux moments "opportuns", et de développer l'habileté des sujets à se centrer sur les caractéristiques pertinentes d'une situation donnée. Un aspect important de l'intervention pédagogique, dans ce contexte, consiste à amener le sujet à "diriger sa propre activité", c'est-à-dire à prendre conscience de ses propres difficultés et à essayer de trouver des solutions par lui-même. Pour reprendre l'une des métaphores de diSessa (1977), les lacunes de la connaissance ne constituent pas, dans cette perspective, des "trous" dénués de signification, mais au contraire des "fenêtres" au travers desquelles il est possible d'accéder à une compréhension plus approfondie et mieux intégrée. L'erreur, source de déséquilibre, est en effet ce qui constitue le principal moteur du processus de rééquilibration par lequel le sujet accède à des niveaux de compétence de plus en plus élevés. C'est elle qui permet au sujet de prendre conscience à la fois de ce qu'il sait et de l'insuffisance de ses connaissances préalables par rapport à une situation donnée. C'est pourquoi le rôle de l'intervenant n'est pas tant de chercher à éviter aux sujets les erreurs que de chercher au contraire à les comprendre et à les exploiter. En somme, l'intervenant doit savoir reconnaître quelles sont, compte tenu des connaissances préalables de l'apprenant, les éléments d'une situation ou d'un environnement qui méritent d'être exploités et de quelles façons ils peuvent l'être.

Nous avons insisté sur le fait qu'une conception à la fois constructive et interactive de l'apprentissage conduisait à mettre l'accent, d'une part, sur les processus cognitifs en jeu dans l'acquisition de connaissances et, d'autre part, sur le rôle de l'environnement en tant que support à la construction, c'est-à-dire à l'organisation progressive des connaissances entre elles. Les considérations relatives au rôle des interventions, au cours de l'exploration, nous permettent maintenant de commencer à apporter quelques éléments de réponse à la questions suivante:

Comment peut-on enseigner tout en respectant le caractère auto-constructeur de la connaissance ?

Autrement dit, quel est le rôle de l'enseignant dans le processus d'équilibration lié à l'apprentissage ? Il est clair que ce rôle ne se situe pas au niveau de la construction elle-même, puisque cette dernière appartient en propre au sujet. L'analyse du rôle des interventions nous permet de constater que ce rôle se situe essentiellement au niveau de l'interaction qui sert de support à l'apprentissage. Dans cette perspective, l'enseignement se saurait être considéré comme une cause directe de l'apprentissage. Il ne fait que *"mettre en branle, faciliter, orienter un processus qui demeure propre au sujet"* (Côté, 1978, p. 218). Il aide l'apprenant à entrer activement en interaction avec un environnement. Le problème de l'enseignement ne se pose plus alors en termes de "transmission" de connaissances nouvelles, mais en termes de médiation des processus interactifs qui sous-tendent l'apprentissage, c'est-à-dire dans l'exploitation que rend possible une situation ou un environnement donné pour des sujets d'un certain niveau. Cette conception de l'enseignement, en tant que processus de médiation des interactions qui servent de support à l'apprentissage, ne conduit nullement à mettre de côté le rôle de l'enseignant, mais plutôt à le redéfinir au sein d'*"un environnement dont la structure dépend à la fois des propriétés intrinsèques à la tâche et des schèmes que possèdent au départ les élèves auxquels elle s'adresse"* (Côté, 1978, p. 219). Le rôle de l'enseignant consiste alors à favoriser la rencontre avec les situations qui vont amener le sujet à prendre conscience de ses propres limites, par rapport à la tâche, et à les dépasser. Il met l'accent, une fois de plus, sur la complémentarité constante des aspects de diagnostic et d'intervention puisque, pour intervenir de façon appropriée, encore faut-il savoir sur quoi précisément doivent porter nos interventions.

BIBLIOGRAPHIE

ABELSON, H. (1983). **Le Logo sur Apple**. Sogiciel Ed.

ABELSON,H. et diSESSA, A. (1979). **Turtle Geometry**. MIT Press, Cambridge, Massachussetts.

ANDERSON, R.C. (1977). "The Notion of Schemata and the Educational Entreprise : General Discussion of the Conference". Dans Anderson, R.C., Spiro, R.J. et Montague, W.E. (Éds). **Schooling and the Acquisition of Knowledge**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum Associates, pp. 415-431.

BEDNARZ, N. et GARNIER, C. (1989). **Constructions des savoirs : Obstacles et Conflits**. Centre International de Recherche sur l'Apprentissage et le Développement en Éducation, Édition d'Arc, UQUAM.

REILIN, H. (1980). "Piaget's Theory : Refinement, Revision, or Rejection ?" Dans **Developmental Models of Thinking**. Édité par Kluwe, R.H. et Spada, H., New-York : Academic Press, pp. 245-261.

BEILIN, H. (1984a). "Functionnalist and Structuralist Research Programs in Developmental Psychology : Incommensurability or Synthesis ?". Dans **Advances in Child Development and Behavior**, volume 18, pp. 245-259.

BEILIN, H. (1984b). "Cognitive Theory and Mathematical Cognition : Geometry and Space". Dans **Applications of Cognitive-Development Theory**. Édité par Gholson, B. et Rosenthal, T.L.

BERGERON, J. C. et HERSCOVICS, N. (1984). "L'épistémologie pédagogique, un moyen d'intégrer la recherche à l'enseignement". Dans **Interface**, novembre-décembre, 1984, pp. 27-31.

BERGERON, J.C. et HESCOVICS, N. (1989). "Un modèle de la compréhension pour décrire la construction de schèmes conceptuels mathématiques". À paraître dans les Actes de la 41ème rencontre de la Commission Internationale pour l'Étude et l'Amélioration de l'Enseignement des Mathématiques, Bruxelles.

BODEN, M. (1977). **Artificial Intelligence and Natural Man**. New-York : Basic Books Inc. Publishers.

BODEN, M. (1982a). "Is Equilibration Important ? A View from Artificial Intelligence". Dans **British Journal of Psychology**, 73, pp. 165-173.

BODEN, M. (1982b). "Chalk and Cheese in Cognitive Science : The Case for Intercontinental Interdisciplinarity". Dans **Cahiers de la Fondation Archives Jean Piaget**, nos 2-3.

BRANDSFORD, J.D., NITSCH, K.E. et FRANKS, J.J. (1977). "Schooling and the Facilitation of Knowing". Dans Anderson, R.C., Spiro, R.J. et Montague, W.E. (Éds) **Schooling and the Acquisition of Knowledge**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum Associates, pp. 31-55.

BRODZINSKY, D.M., SIGEL, I.E. et GOLINKOFF, R.M. (1981). "New Directions in Piagetian Theory and Research : An integrative Perspective". Dans Sigel, I.E., Brodzinsky, D.M. et Golinkoff, R.M., Éditeurs. **New Directions in Piagetian Theory and Practice**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 3-24.

BRNA, Paul (1987). "Confronting Dynamics Misconceptions". Dans **Instructional Science**, volume 16, pp 351-379.

BRNA, Paul (1988). "Confronting Misconception in the Domain of Simple Electrical Circuits". Dans **Instructional Science**, volume 17, pp. 29-55.

BROUGHTON, J. (1977). "Beyond Formal Operations : Theoretical Thought in Adolescence". Dans **Teachers College Record**, 79 (1), pp. 129-132.

BROWN, Ann L. (1978). "Knowing When, Where, and How to Remember : A Problem of Metacognition". Dans Glaser, R., **Advances in Instructional Psychology, volume 1**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 77-165.

CARAMAZZA, A., McCLOSKEY, M. et GREEN, B. (1981). "Naïve Beliefs in 'Sophisticated' Subjects : Misconceptions about Trajectoires of Objects". Dans **Cognition**, 9, pp. 117-123.

CASE, R. (1978). "Piaget and Beyond : Toward a Developmentally Based Theory and Technology of Instruction". Dans Glaser, R., **Advances in Instructional Psychology, volume 1**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 167-224.

CASE, R. (1985). "A Developmentally Based Approach to the Problem of Instructional Design". Dans **Thinking and Learning Skills, volume 2 : Research and Open Questions**. Édité par S.F. Chipman, J.W. Segal et R. Glaser. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 545-562.

CELLÉRIER, G. (1979). "Structures cognitives et schèmes d'action". Dans **Archive de Psychologie**, no 180, pp. 87-106.

CELLÉRIER, G. (1987). "La psychologie génétique et le cognitivisme". Dans **Débat**, no 47 (nov.-déc.), Gallimard, pp. 116-130.

CHAMPAGNE, A.B., KOPLFER, L.E. et ANDERSON, J. (1980). "Factors Influencing Learning of Classical Mechanics". Dans **American Journal of Physics**, 48, pp. 1074-1079.

CHAMPAGNE, A.B., KLOPFER, L.E. et GUNSTONE, R.F. (1982). "Cognitive Research and the Science of Instruction". Dans **Educational Psychologist**, volume 17 (1), pp. 31-53.

CHAMPAGNE, A.B., GUNSTONE, R. et KLOPFER, L.E. (1985). "Instructional Consequences of Student's Knowledge about Physical Phenomena". Dans **Cognitive Structure and Conceptual Change**. Édité par Pines, L.E. et West, L.H.T, pp. 61-90.

CHI, M.T.H., GLASER, R. et REES, E. (1981). "Expertise in Problem Solving". Dans I.R. Sternberg, Editeur. **Advances in the Psychology of Human Intelligence, volume 1**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 7-75.

CHI, M.T.H., FELTOVICH, P.J. et GLASER, R. (1982). "Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices". Dans **Cognitive Science**, 5, pp. 121-152.

CHIPMAN, S.F., SEGAL, J.W. et GLASER, R. (1985). **Thinking and Learning Skills: Current Research and Open Questions**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates.

CLEMENT, J. (1982). "Student's Preconception in Elementary Mechanics". Dans **American Journal of Physics**, no 50, pp. 66-71.

CLEMENT, J. (1983). "A Conceptual Model Discussed by Galileo and Used Intuitively by Physics Students". Dans D. Genter et A. Stevens, Éditeurs. **Mental Models**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 324-341.

CLEMENT, J. (1988). "Observed Methods for Generating Analogies in Scientific Problems". Dans **Instructional Science**, 12, pp. 563-586.

CÔTÉ, B. (1981). **Analyse d'une situation d'apprentissage d'opérations numériques au début du secondaire**. Thèse de doctorat, Université Mc Gill.

diSESSA, A. (1977). "On 'Learnable' Representation of Knowledge : A Meaning for the Computational Metaphor". **Logo Memo**, no 47, M.I.T. A.I. Laboratory, septembre 1977.

diSESSA, A. (1980). "Momentum Flow as an Alternative Perspective in Elementary Mechanics". Dans **American Journal of Physics**, 48 (5), pp. 365-369.

diSESSA, A. (1982). "Unlearning Aristotelician Physics : A Study of Knowledge-Based Learning". Dans **Cognitive Science**, 6, pp. 37-75.

diSESSA, A. (1983). "Phenomenology and the Evolution of Intuition". Dans D. Genter et A. Stevens, Éditeurs. **Mental Models**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 15-33.

diSESSA, A. (1985). "Learning about Knowing". Dans E. Klein, Éditeur. **Children and Computers : New Direction of Child Development**, (28), San Francisco : Jossey-Bass Publishers, pp. 97-124.

diSESSA, A. (1986). "Artificial World and Real Experience". Dans **Instructional Science**, volume 14, nos 3-4, pp. 207-229.

diSESSA, A. (1988). "Knowledge in Pieces". Dans **Constructivism in the Computer Age**. Édité par Forman, G. et Pufall, P.B., Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum Associates, pp. 49-70.

FLAVELL, J.H. (1979). "Metacognition and Cognitive Monitoring". Dans **American Psychologist**, volume 34, no 10, pp. 906-911.

FLAVELL, J.H. (1981). "Cognitive Monitoring". Dans **Children's Oral Communication Skills**. Édité par Dickson, W.P., New-York : Academic Press, pp. 35-60.

FORMAN, G. et PUFALL, P.B. (1988). "Constructivism in the Computer Age : A Reconstructive Epilogue". Dans **Constructivism in the Computer Age**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 235-250.

FREDERICKSON, N. (1984). "Implications of Cognitive Theory for Instruction in Problem Solving". Dans **Review of Educational Research**, volume 54, no 3, pp. 363-409.

FURTH, Hans G. (1981). "Piaget's New Equilibration Model". Dans **Piaget and Knowledge : Theoretical Foundations**. University of Chicago Press, Chicago and London (deuxième édition), pp. 253-283.

GAGNÉ, R.M. (1970). **The Conditions of Learning**. (Seconde édition). New-York : Holt, Rinehart and Winston.

GAGNÉ, R.M. (1977). "Schooling and the Relevance of Research : General Discussion". Dans Anderson, R.C., Spiro, R.J. et Montague, W.E., Éditeurs. **Schooling and the Acquisition of Knowledge**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 405-413.

GARDNER, H. (1985). **The Mind's New Science : A History of the Cognitive Revolution**. New-York : Basic Books Inc. Publishers.

GIORDAN, A. et de VECHI, G. (1987). **Les origines du savoir : des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques**. Paris et Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

GLASER, R. (1976). "Cognitive Psychology and Instructional Design". Dans **Cognition and Instruction**. Édité par D. Klahr.

GLASER, R. (1984). "Education and Thinking". Dans **American Psychologist**, no 39, pp. 93-104.

GLASER, R. (1985). "Learning and Instruction : A Letter from a Time Capsule". Dans **Thinking and Learning Skills, volume 2 : Research and Open Questions**. Édité par S.F. Chipman et J.W. Segal. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum Associates.

GLASER, R. (1987). "Learning Theory and Theories of Knowledge". Dans **Learning and Instruction, volume 1**. Édité par E. De Corte, H. Lodewijks, R. Parmentier et P. Span., Leuven University Press et Pergamon Press, pp. 397-414.

GOLDSTEIN, I. et PAPERT, S. (1977). "Artificial Intelligence, Language, and the Study of Knowledge". Dans **Cognitive Science**, volume 1, no 1, pp. 84-123.

GOLDSTEIN, I. (1980). "Developing a Computational Representation for Problem-Solving Skills". Dans Tuma, D.T. et Reif, F., Éditeurs. **Problem Solving and Education : Issues in Teaching and Research**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 53-79.

GREEN, B.F., Mc CLOSKEY, M. et CARAMAZZA, A. (1985). "The Relation of Knowledge to Problem Solving with Examples from Kinematics". Dans **Thinking and Learning Skills : Current Research and Open Questions, volume 2**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 127-140.

GREENO, J. G. (1976). "Cognitive Objectives of Instruction : Theory of Knowledge for Solving Problems and Answering Questions". Dans **Cognition and Instruction**, Édité par D. Klahr.

GREENO, J.G. (1980). "Analysis of Understanding in Problem solving". Dans **Development Models of Thinking**. R.H. Kluwe et H. Spada, Éditeurs, chapitre 9, pp. 199-211.

GROEN, G. et KIERAN, C. (1983). "In Search of Piagetian Mathematics". Dans **The Development of Mathematical Thinking**. Édité par Ginsburg, H.P., pp. 351-375.

GUNSTONE, J.G. et WHITE, R. (1981). "Understanding of Gravity". Dans **Science Education**, no 65, pp. 291-300.

HABER-SCHAM, DODGE, CROOS, WALTER et TOUGAS (1974, troisième édition). **Physique PSSC.** Adaptation française de l'édition originale publiée par D.C. Heath and Company, U.S.A., Centre éducatif et culturel Inc.

HALBWACKS, F. (1974). **La pensée physique chez l'enfant et chez le savant**. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

HALLOUN, I.A. et HESTENES, D. (1985a). "The Initial Knowledge State of College Student's". Dans **American Journal of Physics**, 53, pp. 1043-1055.

HALLOUN, I.A. et HESTENES, D. (1985b). "Common Sense Concepts about Motion". Dans **American Journal of Physics**, 53, pp. 1056-1065.

HARVEY, J. (1979). **Physique 442-542**. Document de travail - Programme. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Éducation, décembre 1979.

HESCOVICS, N. et BERGERON, J.C. (1989). "Analyse épistémologique des débuts de l'addition". À paraître dans les Actes de la 41ème rencontre de la Commission Internationale pour l'Étude et l'Amélioration de l'Enseignement des Mathématiques, Bruxelles.

HEWSON, P.W. (1981). "A Conceptual Change Approach to Learning Science". Dans **European Journal of Science Education**, (94), pp. 383-396.

HEWSON, P. et BECKETT HEWSON, M. G. (1984). "The Role of Conceptual Conflict in Conceptual Change and the Design of Science Instruction". Dans **Science Instruction**, no 13, pp. 1-13.

HEWSON, P.W. et POSNER, C.J. (1984). "The Use of Schema Theory in the Design of Instructional Materials : A Physic Example" Dans **Instructional Science**, volume 13, no 2, pp. 119-141.

HOFSTADTER, D. (1987). "Cognition, subcognition". Dans **Débat**, no 47 (nov.-déc.), Gallimard, pp. 26-45.

HOOPER, F.H. et DEFRAIN, J.D. (1980). "On Delineating Distinctly Piagetian Contributions to Education". Dans **Genetic Psychology Monographs**, 101, pp. 151-181.

INHELDER, B., SINCLAIR, H. et BOVET, M. (1974). **Apprentissage et structure de la connaissance**. Paris : P.U.F.

INHELDER, B. et PIAGET, J. (1979). "Procédures et Structures". Dans **Archives de Psychologie**, no. 181, 165-176.

JARRET, D.G. (1987). "Learning Schemata : Methods of Representing Cognitive Content and Curriculum Structures in Higher Education". Dans **Instructional Science**, volume 16, pp. 187-211.

JOHSON-LAIRD, P.N. (1980). "Mental Models in Cognitve Science". Dans **Perspective in Cognitive Science**. Édité par D.A. Norman, Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 143-192.

KLAHR, D. (1980). "Information-Processing Models of Intellectual Development". Dans **Developmental Models of Thinking**. Édité par R. H. kluwe et H. Spada, Academic Press, chapitre 6.

KUHN, T. (1971). "Les notions de causalité dans le développement de la physique". Dans **Les théories de la causalité. Études d'Épistémologie génétique, volume XXV**. Paris : P.U.F.

LAKOFF, G. et JOHNSON, M. (1980). "The Metaphorical Structure of the Human Conceptual System". Dans **Perspective in Cognitive Science**. Édité par Donald A. Norman, Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 193-206.

LARKIN, J.H. (1980). "Teaching Problem Solving in Physics : The Psychological Laboratory and the Practical Classroom". Dans **Problem Solving in Education : Issues in Teaching and Research**. Édité par D.T. Turner and Frederik Reif, pp. 111-125.

LARKIN, J.H., McDERMOTT, J., SIMON, D. P. et SIMON, H.E. (1980). "Models of Competence in Solving Physics Problems". Dans **Cognitive Science**, 4, pp. 317-345.

LARKIN, J.H., Mc DERRMOTT, L.C., SIMON, D.P. et SIMON, H.E. (1980). "Expert and Novice Performance in Solving Physic Problems". Dans **Science**, no 208, pp. 1335-1342.

LARKIN, Jill H. (1983). "The Role of Problem Representation in Physics". Dans D. Genter et A. Stevens, Éditeurs. **Mental Models**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 75-99.

LARKIN, J. (1985). "Understanding Problem Representation and Skills in Physics". Dans **Thinking and Learning Skills : Current Research and Open Questions, vo-**

lume 2. Édité par S.F. Chipman, J. Segal et R. Glaser. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 141-160.

LAWLER, R.W. (1982). "Designing Computer-Based Microworlds". Dans **Byte**, volume 7 no 8, pp. 138-161.

LAWLER, R. W. (1985). **Computer Experience and Cognitive Development**. Ellis Howoad Series.

LEGENDRE-BERGERON, M.F. (1978). **Valeur explicative et heuristique du modèle de l'équilibration dans l'analyse psychogénétique du développement de l'intelligence**. Thèse de maîtrise, Université Laval.

LEONARD, F. (1978). "Obstacles cognitifs dans les processus de résolution de problèmes". Dans **Archives de Psychologie**, no 178, 115-131.

LEVY-LEBLOND, J.-M. (1980). **La Physique en Questions : Mécanique**. Paris : Vuibert.

LIEBEN, L.S. (1987). "Information Processing and Piagetian Theory: Conflict or Congruence ?". Dans L.S. Liben, Éditeur. **Development and Learning: Conflict and Congruence ?**. Hillsdale, New Jersey, pp. 109-133.

LOCHHEAD, J. (1988). "Some Pieces of the Puzzle". Dans Forman, G. et Pufall, P.B., Éditeurs. **Constructivism in the Computer Age**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 71-81.

MAURY, L., SALTIEL, E. et VIENNOT, L. (1977). "Étude de la notion de mouvement chez l'enfant, à partir des changements de référentiels". Dans **Revue française de pédagogie,** 40, pp. 15-29.

MARKMAN, E.M. (1981). "Comprehension Monitoring". Dans **Children's Oral Communication Skills**. Édité par Dickson, W.P. New-York : Academic Press.

McCLOSKEY, M., CARAMAZZA, A. et GREEN, B. (1980). "Curvilar Motion in the Absence of External Forces : Naive Beliefs about the Motion of Objects". Dans **Science**, no 210, pp. 1139-1141.

McCLOSKEY, M. (1983a). "Intuitive Physics". Dans **Scientific American**, avril, pp. 122-130.

McCLOSKEY, M. (1983b). "Naive Theories of Motion". Dans D. Genter et A. Stevens, Éditeurs. **Mental Models**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 299-324.

Mc DERMOTT, L.C. (1984). "Research on Conceptual Understanding in Mechanics". Dans **Physics Today**, no 37, pp. 24-32.

MELHER, J. et DUPOUX, E. (1987). "De la psychologie à la science cognitive". Dans **Débat**, no 47 (novembre-décembre), pp. 65-88, Gallimard.

MINSKY, M. et PAPERT, S. (1972). "Artificial Intelligence". **Memo No 252 Progress Report M.I.T.**

MINSKY, M. (1977). "Frame-System Theory". Dans **Thinking : Readings in Cognitive Science**. Johnson-Laird et Wason. Éditeurs, pp. 355-377.

MINSKY, M. (1980). "K-Lines : A Theory of Memory". Dans **Perspective in Cognitive science**. Édité par D.A. Norman. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbraum, Associates, pp. 87-104.

MINSKY, M. (1988). **La société de l'esprit**. Paris : Inter Éditions.

MURRAY, F.B. (1983). "Equilibration as Cognitive Conflict". Dans **Developmental Review**, no 3, pp. 54-61.

MURRAY, F. (1984). "The Applications of Theories of Cognitive Development". Dans **Application of Cognitive Development Theory**. Édité par B. Gholson et T. Rosenthal, Academic Press Inc.

NEILSON, K. (1977). "Cognitive Developement and the Acquisition of Concepts". Dans Anderson, R.C., Spiro, R.J., Montague, W.E., Éditeurs. **Schooling and the Acquisition of Knowledge**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 215-239.

NEWELL, A. "On the Analysis of Human Problem Solving". Dans **Readings in Cognitive Science**. Édité par Johnson-Laird, P.N. et Wason, P., pp. 46-62.

NORMAN, D.A. (1980). "Cognitive Engineering and Education". Dans Tuma, D.T. et Reif, F., Éditeurs. **Problem Solving and Education : Issues in Teaching and Research**.

NORMAN, D.A. (1980). "What is Cognitive Science ?". Dans **Perspective in Cognitive Science**. Édité par D.A. Norman. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 1-12.

NORMAN, D.A. (1980). "Twelve Issues in Cognitive Science". Dans **Perspective in Cognitive Science**. Édité par D.A. Norman. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates.

NOVACK, J.D. et GOWIN, D.B. (1984). **Learning How to Learn**. New-York : Cambridge University.

NUSSBAUM, J. et NOVICK, S. (1982). "Alternative Frameworks, Conceptual Conflict and Accommodation : Toward a Principled Teaching Strategy". Dans **Instructional Science**, volume 11, pp. 183-200.

OGBORDN, J. (1985). "Understanding Student's Understandings : An Exemple from Dynamics". Dans **European Journal of Science Education**, 7 (2), pp. 141-150.

ORTONY, A. (1978). "Remenbering, Understanding, and Representation". Dans **Cognitive Science**, 2, pp. 53-69.

PAPERT, S. (1980). **Mindstorms : Children, Computers and Powerful Ideas**. New-York : Basic Books.

PAPERT, S. (1981). **Jaillissement de l'esprit**. Flammarion.

PAPERT, S. (1988). "The Conservation of Piaget : The Computer as a Grist to the Constructivist Mill". Dans **Constructivism in the Computer Age**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 3-13.

PIAGET, J. et INHELDER, B. (1959). **De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent**. Paris : P.U.F.

PIAGET, J. (1967a). "Épistémologie de la Physique : les données génétiques de l'épistémologie de la physique". Dans J. Piaget, Éditeur. **Logique et connaissance scientifique**. Paris : P.U.F., Encyclopédie de la Pléiade, collection Gallimard, pp. 599-623.

PIAGET, J. (1967b). "Épistémologie de la Physique : les relations entre le sujet et l'objet dans la connaissance physique". Dans J. Piaget, Éditeur. **Logique et connaissance scientifique**. Paris : P.U.F., Encyclopédie de la Pléiade, collection Gallimard, pp. 754-777.

PIAGET, J. (1972, deuxième édition). **Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant**. Paris : P.U.F.

PIAGET, J. (1973a, deuxième édition). "La formation de la notion de force". Dans **Études d'épistémologie génétique, volume XXIX**. Paris : P.U.F.

PIAGET, J. (1973b). "La composition des forces et le problèmes des vecteurs". Dans **Études d'épistémologie génétique, volume XXX**. Paris : P.U.F.

PIAGET, J. (1974a). **Adaptation vitale et psychologie de l'intelligence**. Collection Actualités Scientifiques et industrielles, Hermann.

PIAGET, J. (1974b). **La prise de conscience**. Paris : P.U.F.

PIAGET, J. (1974c). **Réussir et Comprendre**. Paris : P.U.F.

PIAGET, J. (1975). "L'équilibration des structures cognitives : problème central du développement". Dans **Études d'épistémologie génétique, volume XXXIII**. Paris : P.U.F.

PIAGET, J., GARCIA, R., VONECHE, J. et al. (1976). **Épistémologie génétique et équilibration : Hommage à Jean Piaget**. Neuchâtel, Paris et Montreal : Delachaux et Niestlé.

PIAGET, J., GARCIA, R. (1983). **Psychogénèse et Histoire des Sciences**. Paris : Flammarion.

PINES, A.L. (1985). "Toward a Taxonomy of Conceptual Relations and the Implications for the Evaluation of Cognitive Structures". Dans **Cognitive Structure and Con-**

ceptual Change. A.L. Pines et L.H.T. West, Éditeurs. New-York : Academic Press, pp. 101-115.

PINES, A.L. et WEST, L.E. (1985) **Cognitive Structure and Conceptual Change**. New York : Academic Press.

POSNER, G.J., HEWSON, P.W. et GERTZOG, W.A. (1982). "Accommodation of a Scientific Conception : Toward a Theory of Conceptual Change". Dans **Science Education**, 66 (2), p. 211-217.

PRIEST, A.G. (1986). "Solving Problems in Newtonian Mechanics". Dans **Instructional Science**, volume 14, nos 3-4, pp. 339-357.

PUFALL, P.B. (1988). "Function in Piaget's System : Some Notes for Constructors of Microworlds". Dans **Constructivism in the Computer Age**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 15-35.

RAMSDEN, P. (1988). **Improving Learning : New Perspectives**. Édité par Paul Ramsden, Kogan Page.

REIF, F. et HELLER, J. I. (1982). "Knowledge Structure and Problem Solving in Physics". Dans **Educational Psychologist**, volume 17, no 2, pp. 102-127.

REIF, F. (1985). "Acquiring an Effective Understanding of Scientific Concepts". Dans **Cognitive Structure and Conceptual Change**. Édité par Leo H.T. West et A. L. Pines, pp. 133-152.

REIF, F. (1987). "Interpretation of Scientific or Mathematical Concepts : Cognitive Issues and Instructional Implications". Dans **Cognitive Science**, volume 11, no 4, pp. 395-417.

RESNICK, L.B. (1980). "The Role of Invention in the Development of Mathematical Competence". Dans **Developmental Models of Thinking**. Édité par Kluwe, R.H. et Spada, H. New-York : Academic Press, pp. 213-244.

RESNICK, L.B. (1984). "Toward an Applied Developmental Theory". Dans **Application of Cognitive Development Theory**. Édité par B. Gholson et T. Rosenthal, Academic Press, Inc., pp. 263-281.

RESNICK, L.B. (1987). "Constructing Knowledge in School". Dans L.S. Liben, Éditeur. **Development and Learning : Conflict or Congruence ?** Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 19-51.

RESNICK, L.B. (1989a). Convictions ontologiques dans l'apprentissage de la physique" Dans **Constructions des savoirs : obstacles et conflits**. CIRAD, N. Bednarz et C. Garnier, Agence d'Arc Inc., UQUAM, pp. 103-110.

RESNICK, L.B. (1989b). "Les approches pédagogiques et les conceptions conflictuelles". Dans **Constructions des savoirs: obstacles et conflits**. CIRAD, N. Bednarz et C. Garnier, Agence d'Arc Inc., Ottawa, pp. 268-276.

RICH, Elaine (1983). **Artificial Intelligence**. Édité par Mc Graw-Hill Book Company.

RUMELHART, D.E et ORTONY, A. (1977). "The Representation of Knowledge in Memory". Dans **Schooling and the Acquisition of Knowledge**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 99-135.

RUMELHART, D. (1977). **Introduction to Human Information Processing**. Édité par Johnson Wiley and Sons.

RUMELHART, D.E. (1980). "Schemata : The Building Blocks of Cognition". Dans **Theoretical Issues in Reading Comprehension**. Édité par R.J. Spiro, B.C. Bruce, W.F. Brewer. Hillsdale, New Jersey, pp. 33-57.

RUMELHART, D.A. (1983-84). "Understanding Understanding". Dans **Understanding Reading Comprehension**. Édité par Flod, J. San Diego : State University, pp. 1-20.

SCHANK, R.C. (1980). "Language and Memory". Dans **Perspective in Cognitive Science**. Édité par D.A. Norman. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 105-147.

SCHANK, R. et HUNTER, L. (1985). "The Quest to Understand Thinking". Dans **Byte**, avril 85, pp. 143-155.

SCHANK, R.C. et CHILDERS, P. (1985). **The Cognitive Computer : on Language, Learning and Artificial Intelligence**. Addison-Wesley Publishing Compagny.

SCHANK, R.C. et ABELSON, R.P. (1977). "Scripts, Plans and Knowledge". Dans **Thinkings : Readings in Cognitive Science**. Édité par Johnson-Laird, P.N. et Wason, P., pp. 411-435.

SCHOENFELD, A.H. (1983). "Beyond the Purely Cognitive; Beliefs Systems, Social Cognitions, and Metacognitions As Driving Forces in Intellectual Performance". Dans **Cognitive Science**, 7, pp. 329-363.

SIEGLER, R.S. et KLAHR, D. (1982). "When Do Children Learn ? The Relationship between Existing Knowledge and the Acquisition of Knew Knowledge". Dans **Advances in Instructional Psychology, volume 2**. Édité par R. Glaser, pp. 121-211.

SIMON, H.A. (1980). "Cognitive Science : The Newest Science of the Artificial". Dans **Perspective in Cognitive Science**. Édité par D.A. Norman. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbraum, Associates, pp. 13-27.

SMITH, L. (1987a). "Developmental Theory in the Classroom". Dans **Instructional Science**, volume 16, pp. 151-167.

SMITH, L. (1987b). "Developmental Theory and Teachers' Practice". Dans **Instructional Science**, volume 16, pp. 307-317.

STRAUSS, S. (1986). "Three Sources of Differences between Educational and Developmental Psychology : Resolution through Educational-Developmental Psychology". Dans **Instructional Science**, volume 15, pp. 275-286.

STRAUSS, S. (1987). "Educational-Developmental Psychology and School Learning". Dans S. Liben, Éditeur. **Development and Learning : Conflict or Congruence ?** Hillsdale, New Jersey, pp. 129-159.

TIBERGHIEN, A. (1989). Phénomènes et situations matérielles : quelles interprétations pour l'élève et le physicien ? Dans **Constructions des savoirs : obstacles et conflits**. CIRAD, N. Bednarz et C. Garnier, Agence d'Arc Inc., UQUAM, pp. 93-102.

TROWBRIDGE, D.E. et Mc DERMOTT, L.C. (1980). "Investigation of Student's Understanding of the Concept of Velocity in one Dimension". Dans **American Journal of Physics**, no 48, pp. 1020-1028.

TROWBRIDGE, D.E. et Mc DERMOTT, L.C. (1981). "Investigation of Student's Understanding of the Concept of Acceleration in one Dimension". Dans **American Journal of Physics**, no 49, pp. 242-253.

VERGNAUD, G. (1983). "Pourquoi une perspective épistémologique est-elle nécessaire pour la recherche sur l'enseignement des mathématiques ?" Dans **North American Chapter of the International Group for the Psychology of Mathematics Education**, volume 1. Édité par Bergeron, J. C. et Herscovics, N., pp. 21-39.

VERGNAUD, G. (1989a). "Dificultés conceptuelles, erreurs didactiques et vrais obstacles épistémologiques dans l'apprentissage des mathématiques". Dans **Constructions des savoirs : obstacles et conflits**. CIRAD, N. Bednarz et C. Garnier, Agence d'Arc Inc., UQUAM, pp. 33-41.

VERGNAUD, G. (1989b). "L'obstacle des nombres négatifs et l'introduction à l'algèbre". Dans **Constructions des savoirs: obstacles et conflits**. CIRAD, N. Bednarz et C. Garnier, Agence d'Arc Inc., UQUAM, pp. 76-83.

VIENNOT, L. (1976). "Les étudiants et Newton". Dans **La recherche**, no 72, pp. 980-983.

VIENNOT, L. (1979). **Le Raisonnement spontané en Dynamique élémentaire**. Paris : Hermann.

VIENNOT, L. (1989a). "Tendances à la réduction fonctionnelle : obstacle au savoir scientifique et objet de consensus". Dans **Constructions des savoirs : obstacles et conflits**. CIRAD, N. Bednarz et C. Garnier, Agence d'AAC Inc., Ottawa, pp. 84-92.

VIENNOT, L. (1989b). "Obstacles épistémologiques et raisonnements en physique : tendances au contournement des conflits chez les enseignants". Dans **Constructions des savoirs : obstacles et conflits**. CIRAD, N. Bednarz et C. Garnier, Agence d'Arc Inc., UQUAM, pp. 117-129.

VON GLASERSFELD (1983). "Learning as a Constructive Activity". Dans **North American Chapter of the International Group for the Psychology of Mathematics Education**, volume 1. Édité par Bergeron, J.C. et Herscovics, N., pp. 41-69.

WEINERT, F.E. et KLUWE, R.H. (1987). **Metacognition, Motivation and Understanding**. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates.

WEST, L. (1988). "Implication of Recent Researchs for Improving Secondary School Science Learning". Dans **Improving Learning : New perspectives**. Édité par Paul Ramsden, pp. 51-69.

WINOGRAD, T. (1980). "What Does It Mean to Understand Language ?" Dans **Perspective in Cognitive Science**. Édité par D.A. Norman. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum, Associates, pp. 231-265.

WINSTON, P.H. (1977). **Artificial Intelligence**. Addison-Wesley Publishing Co.

WHITE, B. (1981). **Designing Computer Games to Facilitate Learning**. Thèse de doctorat, M.I.T.

WHITE, B.Y. (1983). "Sources of Difficulty in Understanding Newtonian Dynamics". Dans **Cognitive Science**, 7, pp. 41-65.

WHITE, B. (1984). "Designing Computer Activities to Help Physics Students Understand Newton's Laws of Motion". Dans **Cognition and Instruction**, 1, pp. 69-108.

WHITE, B. et HORWITZ, P. (1988). "Computer Microworlds and Conceptual Change : A New Approach to Science Education". Dans **Improving Learning : New Perspectives**. Édité par Paul Ramsden, pp. 69-81.

YAZDANI, M. et LAWLER, R. (1986). "Artificial Intelligence and Education : An Overview". Dans **Instructional Science**, volume 14, nos 3-4, pp. 197-207.

ANNEXE

Programme du système des vitesses et orientations

Nom du programme

"MICRO. 1

Liste des procédures

```
TO PROMICRO1
OP [PROMICRO1 NOIR CT MICRO1 DEPART1 MOUV1 COMMOUV1 ACCV
RALENTI IMPVX IMPH APPELF APPEL3]
END

TO NOIR
SETBG :BLACK
LOADSHAPES "DIRECTIONS
END

TO CT
CLEARTEXT
END

TO MICRO1
DEPART1
MOUV1 :X
END

TO DEPART1
CS
PU
TELL :ALL HIDE
TELL 0
SETSH 0
SHOW
SETH 45
MAKE "X 20
IMPH IMPVX
END

TO MOUV1 :X
IF :X > 100 [SETS 100] [SETS :X]
IF KEYP [COMMOUV1 RC]
MOUV1 :X
END
```

```
TO COMMOUV1 :COM
IF :COM = "S [RT 5 IMPH]
IF :COM = "A [LT 5 IMPH]
IF :COM = "' [ACCV IMPVX]
IF :COM = ";. [RALENTI IMPVX]
IF :COM = "D [DEPART1]
IF :COM = "C [PU HOME MAKE "X 0 IMPH]
IF :COM = CHAR 51 [APPEL3 MICRO3]
IF :COM = CHAR 0 [APPEL2 MICRO2]
REPEAT 10 [IF KEYP [MAKE "COM RC]]
END

TO ACCV
MAKE "X :X + 5
END

TO RALENTI
IF :X = 0 [STOP]
MAKE "X :X - 5
END

TO IMPVX
SETCURSOR [20 22] PR [ ]
SETCURSOR [20 20]
PR :X
IF :X - 100 [SETCURSOR [20 22] PR [MAXIMUM: 100] ]
END

TO IMPH
SETCURSOR [10 20]
PR HEADING
IMPVX
END

TO APPEL2
ERALL
RECYCLE
LOAD "MICRO.2
PRINTER 9
MICRO2
END

TO APPEL3
ERALL
RECYCLE
LOAD "MICRO.3
PRINTER 9
MICRO3
END
```

Mode d'utilisation du programme

Pour introduire le système des vitesses et orientations : taper, dans l'ordre, les instructions suivantes :

LOAD "MICRO 1

NOIR

MICRO1

Pour passer au système des flèches : appuyer simultanément sur : la touche CONTROL et le chiffre 2

Pour passer au système des coups : appuyer simultanément sur : la touche CONTROL et le chiffre 3

Le système des flèches

Titre du programme

"MICRO 2

Liste des procédures

```
TO PROMICRO2
OP [PROMICRO2 NOIR CT MICRO2 DEPART2 IMPRIME MOUV2 COMMOUV2
IMPVX IMPVY IMPVDT IMPO ORIENT APPEL1 APPEL3]
END

TO NOIR
SETBG :BLACK
LOADSHAPES "DIRECTIONS

TO CT
CLEARTEXT
END

TO MICRO2
DEPART2
MOUV2 :VX :VY
END

TO DEPART2
CS
TELL [1 3] HIDE
TELL 0 PU
SETSH 0
SETCOLOR :GREEN
SHOW
MAKE "VX 0
MAKE "VY 0
CT
IMPRIME
END

TO IMPRIME
TELL 1 PU SETSH 25 SETPOS [-70 70] SHOW SETCURSOR [9 6]
PR :VX
TELL 3 PU SETSH 26 SETPOS [-70 45] SHOW SETCURSOR [9 3]
PR :VY
```

```
SETCURSOR [2 18] PR "MOUVEMENT
SETCURSOR [ 3 20]
PR "VITESSE: IMPVDT
SETCURSOR [3 22]
PR "ORIENTATION: IMPO
END

TO MOUV2 :VX :VY
TELL 0
IF :VIT > 100 [SETS 100 SETH :CAP] [SETXVEL :VX SETYVEL :VY]
IF KEYP [COMMOUV2 RC]
MOUV2 :VX :VY
END

TO COMMOUV :COM
IF :COM = CHAR 21 [MAKE "VX :VX + 10 IMPVY IMPVX PR [ ] IMPVDT IMPO]
IF :COM = CHAR 8 [MAKE "VX :VX - 10 IMPVY IMPVX PR[ ] IMPVDT IMPO]
IF :COM = CHAR 10 [MAKE "VY :VY - 10 IMPVY IMPVX PR[ ] IMPVDT IMPO]
IF :COM = CHAR 11 [MAKE "VY :VY + 10 IMPVY IMPVX PR[ ] IMPVDT IMPO]
IF :COM = "D [DEPART2]
IF :COM = CHAR 51 [APPEL3]
IF :COM = CHAR 49 [APPEL1]
REPEAT 10 [IF KEYP [MAKE "COM RC]]
END

TO IMPVX
SETCURSOR [9 6] PR :VX
END

TO IMPVY
SETCURSOR [9 3] PR :VY
END

TO IMPVDT
SETCURSOR [11 20]
MAKE "VIT (ROUND (SQRT :VX * :VX + :VY * :VY) * 100 ) / 100
PR :VIT
IF :VIT > 100 [SETCURSOR [20 20] PR [MAXIMUM: 100]]
END

TO IMPO
MAKE "CAP ORIENT
SETCURSOR [15 22]
PR :CAP
PR [ ]
END

TO ORIENT
IF :VIT = 0 [OUTPUT [ ]]
```

```
IF :VX = 0 [IF :VY < 0 [OUTPUT 180] [OUTPUT 0]]
IF :VY = 0 [IF :VX < 0 [OUTPUT 270] [OUTPUT 90]]
IF :VX > 0 [IF :VY < 0 [OUTPUT ( (ROUND (ARCTAN :VX /
:VY) * 100) / 100) - 180)] ]
IF :VX < 0 [IF :VY < 0 [OUTPUT ( (ROUND (ARCTAN :VX /
:VY) * 100) / 100) + 180)] ]
OUTPUT (ROUND (ARCTAN :VX / :VY) * 100) / 100)
END

TO APPEL1
ERALL
RECYCLE
LOAD "MICRO.1
MICRO1
END

TO APPEL3
ERALL
LOAD "MICRO.3
.PRINTER 9
MICRO3
END
```

Mode d'utilisation du programme

Pour introduire le système des flèches : taper dans l'ordre les instructions suivantes :

```
LOAD "MICRO.2

NOIR

MICRO2
```

Pour passer au système des vitesses et orientations : appuyer simultanément sur : la touche CONTROL et le chiffre 1

Pour passer au système des coups : appuyer simultanément sur : la touche CONTROL et le chiffre 3

Programme du système des coups

Nom du programme

"MICRO.3

Liste des procédures

```
TO PROMICRO3
OP [PROMICRO3 NOIR CT MICRO3 DEPART3 DT COMMOUV3 BOUGETORTUE
IMPRIME IMPF IMPH IMPVDT IMPO GRANDEUR ORIENTATION ORIENT COUP
APPEL1 APPEL2]
END

TO NOIR
SETBG :BLACK
LOADSHAPES "DIRECTIONS

TO CT
CLEARTEXT
END

TO DEPART3
CS
PU
TELL :ALL HIDE
TELL 0
SETSH 0
SETCOLOR :GREEN
SHOW
MAKE "ANGLE 0
MAKE "VX 14.14
MAKE "VY 14.14
MAKE FORCE 0
CT
IMPRIME
BOUGETORTUE
END

TO DT
IF KEYP [COMMOUV3 RC]
DT
END
```

```
TO COMMOUV3 :COM
IF :COM = "D [PR [ ] DEPART3]
IF :COM = "C [PU HOME MAKE "VX 0 MAKE "VY 0 MAKE "FORCE
0 MAKE "ANGLE 0 PR [ ] IMPRIME
IF :COM = "G [GRANDEUR]
IF :COM = "O [ORIENTATION]
IF :COM = "P [COUP]
IF :COM = CHAR 0 [APPEL2 MICRO2]
IF :COM = CHAR 49 [APPEL1 MICRO1]
REPEAT 10 [IF KEYP [MAKE "COM RC] ]
END

TO BOUGETORTUE
IF :VIT > 100 [SETS 100] [SETS :VIT]
SETH :CAP
END

TO IMPRIME
SETCURSOR [2 0] PR "COUP:
SETCURSOR [3 2] PR "GRANDEUR:
SETCURSOR [3 4]
PR "ORIENTATION:
SETCURSOR [2 18] PR "MOUVEMENT
SETCURSOR [3 20]
PR "VITESSE: IMPVDT
SETCURSOR [3 22]
PR "ORIENTATION: IMPO
END

TO IMPF
SETCURSOR [12 2]
PR :FORCE
END

TO IMPH
SETCURSOR [15 4]
PR :ANGLE
END

TO IMPVDT
SETCURSOR [11 20]
MAKE "VX (ROUND :VX * 100) / 100
MAKE "VY (ROUND :VY * 100) / 100
MAKE "VIT SQRT :VX * VX + :VY * :VY
MAKE "VIT (ROUND :VIT * 100) / 100
PR :VIT
IF :VIT  100 [SETCURSOR [20 20] PR [MAXIMUM: 100] ]
END
```

```
TO IMPO
SETCURSOR [15 22]
MAKE "CAP ORIENT
IF :VIT = 0 [PR [ ] ] [PRINT :CAP]
END

TO GRANDEUR
PR [ ]
SETCURSOR [12 2]
MAKE "FORCE FIRST RL
MAKE "FORCE (ROUND :FORCE * 100) / 100
SETCURSOR [12 2]
PR :FORCE
END

TO ORIENTATION
PR [ ]
SETCURSOR [12 2] PR :FORCE
SETCURSOR [15 4]
MAKE "ANGLE FIRST RL
IF :ANGLE - 0 [MAKE "ANGLE 360 + :ANGLE]
MAKE "ANGLE (REMAINDER 1000 * :ANGLE 360000) / 10
MAKE "ANGLE (ROUND :ANGLE) / 100
SETCURSOR [15 4] PR :ANGLE
END

TO ORIENT
IF :VX = 0 [IF :VY < 0 [OUTPUT 180] [OUTPUT 0] ]
IF :VY = 0 [IF :VX < 0 [OUTPUT 270] [OUTPUT 90] ]
IF :VX > 0 [IF :VY < 0 [OUTPUT ((ROUND (ARCTAN :VX / :VY)
* 100) / 100) - 180] ]
IF :VX < 0 [IF :VY < 0 [OUTPUT ((ROUND (ARCTAN :VX / :VY)
* 100) / 100) + 180] ]
OUTPUT (ROUND (ARCTAN :VX / :VY) * 100) / 100
END

TO COUP
IF :FORCE = 0 [STOP]
TELL 0 SETSH (:ANGLE / 15) + 1 SETCOLOR :RED
MAKE "VX (ROUND :VX * 100) / 100 + :FORCE * SIN :ANGLE
MAKE "VY (ROUND :VY * 100) / 100 + :FORCE * COS :ANGLE
PR [ ]
IMPVDT IMPO
BOUGETORTUE
SETSH 0 SETCOLOR :GREEN
END

TO APPEL1
.PRINTER 0
```

```
ERALL
RECYCLE
LOAD "MICRO.1
END

TO APPEL2
ERALL
RECYCLE
LOAD "MICRO.2
END
```

Mode d'utilisation du programme

Pour introduire le système des coups : taper, dans l'ordre, les instructions suivantes :

```
LOAD "MICRO.3

NOIR

MICRO3
```

Pour passer au système des vitesses et orientations : appuyer simultanément sur : la touche CONTROL et le chiffre 1

Pour passer au système des flèches : appuyer simultanément sur : la touche CONTROL et le chiffre 2

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
PUBLICATIONS DE LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION
VICE-DÉCANAT AUX ÉTUDES SUPÉRIEURES ET À LA RECHERCHE

Les Publications de la Faculté des sciences de l'éducation visent principalement la diffusion de travaux de recherche réalisés par les professeurs, les étudiants et les équipes de recherche de la Faculté.

Un des intérêts des Publications réside dans le fait qu'elles constituent un lieu unique de diffusion de travaux de différents genres qui ne peuvent pas facilement être publiés soit chez un éditeur à cause de leur caractère spécialisé, soit dans des revues savantes à cause de leur dimension trop considérable. Les ouvrages parus dans les Publications se regroupent en cinq collections différentes : Rapports de recherche, la Revue Repères, Actes de Colloque, Prix Jeanne-Grégoire et la Collection spéciale.

RAPPORTS DE RECHERCHE

Cette collection comprend des rapports de recherche, subventionnée ou non, qui se présentent en général sous la forme de monographie. Les rapports peuvent présenter les résultats finaux d'une recherche ou encore le texte préliminaire d'un rapport final. Le nombre de pages considérable alloué à ces rapports permet de fournir une étude approfondie des questions traitées.

ALLAIRE, Carole; BRUNELLE, Louise et PELLETIER, Guy (1985). Nouveau-Départ : un bilan. Rapport de recherche no 012, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 312 pages.
14,00$

ARCHAMBAULT, Jean; BRUNET, Luc et GOUPIL, Georgette (1984). Directions d'école et enseignants face au stress : le rôle du climat organisationnel dans l'anxiété. Rapport de recherche no 011, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 68 pages.
4,00$

BARRET, Gisèle (1986). Essai sur la pédagogie de la situation en expression dramatique et en éducation. Rapport de recherche no 025, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 194 pages.

Épuisé

BOURRET, André et PELLETIER, Guy (1985). Fragment d'une histoire de l'éducation au Québec. Rapport de recherche no 018, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 169 pages.

Épuisé

BRASSARD, André (1984). Le projet éducatif : plan d'action ou idées de l'école. Imprimé par la Commission scolaire de St-Exupéry, 55 pages.

Épuisé

BRASSARD, André (1984). S'approprier la réalité de l'école : IODRE (Instrument pour observer et décrire la réalité de l'école). Imprimé par la Commission scolaire de St-Exupéry.

Épuisé

BRASSARD, André; BRUNET, Luc; CORRIVEAU, Lise et PÉPIN, Richard; MARTINEAU, Georges (1986). Les rôles des directions d'école au Québec : 2ième partie. L'exercice des rôles et l'efficacité organisationnelle. Rapport de recherche no 021, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 268 pages.

13,00$

BRUNET, Luc; BRASSARD, André; CORRIVEAU, Lise et PÉPIN, Richard (1985). Le rôle du directeur d'école : 1ère partie. Rapport de recherche no 017, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 165 pages.

Épuisé

BRUNET, Luc et GOUPIL, Georgette (1983). Enseignants et directions d'école face à l'intégration scolaire des enfants en difficulté. Rapport de recherche no 002, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 90 pages.

Épuisé

BUTEAU, Paul-Henri et PELLETIER, Guy (1985). Les services scolaires pour les élèves handicapés visuels... Le point de vue des parents. Rapport de recherche no 020, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 125 pages.

Épuisé

CHENÉ, Adèle (1989). La formation et les personnes âgées. Principes et pratiques. Rapport de recherche no 032, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 126 pages.

9,00$

CHENÉ, Adèle et FLEURY, Marie-José (1990). La dimension relationnelle de la formation des personnes âgées. Rapport de recherche no 034, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, Université de Montréal, 108 pages.

9,00$

CHENÉ, Adèle et PAINCHAUD, Gisèle (1986). Vieillissement et formation reliée à l'emploi. Rapport de recherche no 024, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal,163 pages.

10,00$

COMEAU, Michelle et GOUPIL, Georgette (1984). Le statut sociométrique d'enfants mésadaptés socio-affectifs et en trouble d'apprentissage intégrés dans des classes ordinaires. Rapport de recherche no 007, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 75 pages.

5,00$

COMEAU, Michelle et GOUPIL, Georgette (1985). L'intégration des enfants mésadaptés socio-affectifs au primaire. Rapport de recherche no 016, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 107 pages.

6,00$

D'ANGLEJAN, Alison; PAINCHAUD, Gisèle et VINCENT, Diane (1982). Acquisition du français par un groupe d'immigrants asiatiques. 86 pages.

Épuisé

DUPONT, Chantal; LA ROCQUE, Gabriel et THIVIERGE, Renée (1985). La télévision et les jeunes. Rapport de recherche no 014, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 284 pages.

Épuisé

DUPUIS, Philippe; BRUNET, Luc; BOURRET, André; LAVOIE-STE- MARIE, Pierrette; ST-GERMAIN, Pierre et TRINH THI, Tuyet (1989). Le mitan de la vie et la vie professionnelle des directions d'école du Québec. Rapport de recherche no 031, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 190 pages.

12,00$

DUPUIS, Philippe; BRUNET, Luc; HAMEL, Marie-Josée; LAVOIE-STE-MARIE, Pierrette et ST-GERMAIN, Pierre (1985). Le mitan de la vie et la vie professionnelle, partie 1. Rapport de recherche no 019, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 253 pages.

Épuisé

DUPUIS, Philippe et DION, Jean-François (1982). La formation pratique en milieu universitaire. Rapport de recherche no 001, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 270 pages.

Épuisé

FARINE, Avidgor (1981). La perception des employeurs des liens qui existent entre la formation et l'emploi. Rapport de recherche, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 137 pages.
Épuisé

FARINE, Avidgor (1985). Les liens entre la formation et l'emploi : l'exemple de la RFA. Rapport de recherche no 013, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 62 pages.
4,00$

FOTINAS, Constantin (1981). Le Café-École vers une libération systémique de l'acte d'apprendre. Rapport de recherche, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 75 pages.
Épuisé

GAGNON, Marc et OUELLET, Valmont (1984). De l'atelier à l'école. Une étude sur la formation des maîtres de l'enseignement professionnel. Rapport de recherche no 010, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 120 pages.
7,00$

GAUDREAU, Jean (1983). Enquête sur les connaissances des adolescents montréalais. Rapport de recherche no 006, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 123 pages.
Épuisé

GAUDREAU, Jean (1984). L'acquisition des connaissances chez l'adolescent. Sept rapports de recherche. Rapport de recherche no 008, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 106 pages.
6,00$

GAUDREAU, Jean et CANEVARO, Andrea (1990). L'éducation des personnes handicapées. Hier et aujourd'hui. Rapport de recherche no 035, Publica- tions de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 240 pages.
18,00$

GOUPIL, Georgette et COMEAU, Michelle (1983). Étude exploratoire sur l'intégration de l'élève mésadapté socio-affectif. Rapport de recherche no 005, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 120 pages.
7,00$

HACHÉ, Jean-Baptiste et CRESPO, Manuel (1989). Avec la collaboration de C. BOULARD. **Austérité budgétaire et gestion dans les universités québécoises : Stratégies, conséquences et prospective. Rapport de recherche : Problématique et description des variables**. Rapport de recherche no 033, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 210 pages.
13,00$

LAMBERT R., Nancy, collaboration : BERNHARD, Paulette et PAGOLA, Gracia (1991). Répertoire mondial des collections et des fonds d'archives de l'art des enfants. World Directory of Collections and Archives of Children's Art. Rapport de recherche no 036, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 198 pages.

16,00$

LEFEBVRE, André (1986). Marie-Victorin éducateur. Rapport de recherche no 026, Éditions Guérin et Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 203 pages.

10,00$

LEGENDRE-BERGERON, Marie-Françoise (1993). Étude du développement d'une compréhension qualitative de l'effet d'une force sur un mobile dans le contexte d'un micromonde de mouvement. Rapport de recherche no 041, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 334 pages.

27,00$

LEMOYNE, Gisèle et TRÉPANIER, Louise (1985). Connaissances et habiletés en mathématiques des élèves en adaptation scolaire. Rapport de recherche no 015, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 131 pages.

7,00$

McANDREW, Marie (1986). Études sur l'ethnocentrisme dans les manuels scolaires de langue française du Québec. Préface de Claude LESSARD. Rapport de recherche no 028, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 206 pages.

12,00$

McANDREW, Marie (1991). L'enseignement des langues d'origine à l'école publique en Ontario et au Québec (1977-1989) : Politiques et enjeux. Rapport de recherche no 039, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 404 pages.

30,00$

MORIN, André (1986). La recherche-action en éducation : de la pratique à la théorie. Rapport de recherche no 022, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 350 pages.

Épuisé

NONNON, Pierre (1986). Laboratoire d'initiation aux sciences assisté par ordinateur. Rapport de recherche no 023, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 162 pages.

14,00$

PAINCHAUD, Gisèle et CRESPO, Stéphane (1993). 1. Recueil de résumés de textes (1977-1991). TARRAB, Elca, OLLIVIER, Émile et MALOUIN, Marie-Paule (1993). 2. Rapport de recherche : Une expérience d'enseignement des langues d'origine. Analyse des perceptions des intervenants en milieu scolaire. Le programme d'enseignement des langues d'origine (PELO). Rapport de recherche no 040, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 188 pages.

16,00$

PARET, Marie-Christine (1991). La syntaxe écrite des élèves du secondaire. Rapport de recherche no 038, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 290 pages.

23,00$

PELLETIER, Guy (1982). Des garderies, des garderies... Rapport de recherche no 000, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 90 pages.

Épuisé

PELLETIER, Guy (1983). Faire garder nos enfants. Rapport de recherche no 003, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 195 pages.

Épuisé

PELLETIER, Guy (1988). Les éducatrices et éducateurs en garderie du Québec : Orientations professionnelles et satisfaction au travail. Rapport de recherche no 030, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 223 pages.

14,00$

PELLETIER, Guy; collaboration : CRESPO, Manuel (1981). Le jeune immigrant dans le système scolaire. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 210 pages.

Épuisé

PELLETIER, Guy; collaboration : PONTON, Lise (1984). Une enquête auprès des travailleuses en garderies. Rapport de recherche no 009, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 170 pages.

9,00$

SAINT-JACQUES, Diane (1991). L'attitude créative en activités dramatiques et Description d'une pratique d'une recherche qualitative. Rapport de recherche no 037, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 186 pages.

15,00$

STE-MARIE, Louis et KAHLER, David (1988). Évaluation des acquisitions en lecture et écriture durant la phase I et la phase II de la "Misyon Alfa" (Alphabétisation) en Haïti. Rapport de recherche no 029, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 180 pages.

12,00$

VAN DER MAREN, Jean-Marie (1983). Effets de stratégies de communication et d'interaction selon leurs modalités et leurs conditions d'application. Rapport de recherche no 004, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 245 pages.

Épuisé

REPÈRES - ESSAIS EN ÉDUCATION

Cette collection se présente sous la forme d'une revue comprenant des articles de fond dont la dimension varie de 50 à 80 pages. Ces articles peuvent présenter des essais sur l'éducation et ses différents aspects, des rapports de recherche plus succincts que ceux de la collection précédente, des résumés substantiels de thèses de doctorat ou de mémoires de maîtrise, des rapports préliminaires de recherche ou des rapports d'étape. La revue Repères fait paraître aussi des numéros thématiques regroupant des articles autour d'un sujet spécifique.

REPÈRES. Essais en éducation, no 1, (1982). Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 175 pages.

Le climat organisationnel : mythe ou réalité. Luc BRUNET - Les méthodes quantitatives propres aux études longitudinales. Clément DASSA - Les systèmes d'apprentissage opérationnels (SAO). Réal LAROSE et Serge RACINE - Contribution à l'histoire de l'enseignement au primaire québécois (1949-1980). André LEFEBVRE et Geneviève RACETTE.

6,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 2, (1983). Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 161 pages.

La mémorisation de textes et les personnes handicapées sur le plan cognitif. Jacques LANGEVIN - Tests d'hypothèses d'une différence nulle d'espérances mathématiques. Georges MARTINEAU - Contexte, texte ou mémoire : de quoi dépend la compréhension d'un message? Bernadette SKA.

Épuisé

REPÈRES. Essais en éducation, no 3, (1983). Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 123 pages.

Les structures d'accueil pour la petite enfance au Québec : continuité ou division des expériences éducatives. Raquel BETSALEL-PRESSER et Ninon DENOMMÉE-ROBITAILLE - Le portemanteau récalcitrant. Contribution à l'étude de la théorie de Gagné sur la résolution de problème. Colette DUFRESNE-TASSÉ et Jacinthe ARPIN. La pédagogie universitaire au Québec depuis le Rapport Parent : éléments d'un historique. André LEFEBVRE et Geneviève RACETTE.

Épuisé

REPÈRES. Essais en éducation, no 4, (1984). Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 134 pages.

Onze propositions et quelques considérations sur la motivation de l'étudiant adulte. Colette DUFRESNE-TASSÉ - Les principes d'une politique d'évaluation de l'apprentissage au CEGEP. Luce GOERLACH et Serge RACINE - Variation du contenu lexical de l'évaluation dans une tâche de découverte guidée gérée par ordinateur. Jean-Marie VAN DER MAREN.

6,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 5, (1985). Numéro thématique. Les alternatives aux plans expérimentaux dans la mise à l'épreuve d'hypothèses en éducation. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 121 pages.

Pour une conception de l'hypothèse et de la recherche en éducation. Jean-Marie VAN DER MAREN - À partir de l'histoire de la vérification des hypothèses : indications épistémologiques. Normand BAILLARGEON - L'entre-deux légitimations de la science à la pratique. Yves POISSON - L'entrevue clinique comme méthode de recherche en éducation. Bernadette SKA - L'étude de cas comme méthode de recherche organisationnelle en éducation. André BRASSARD - L'observation et le système du sujet. Bibiane d'ANJOU - Instruments de recherche et statut du sujet. Marie LAROCHELLE - Histoire de vie et changement paradigmatique en éducation. Gaston PINEAU - Quelques notes sur la méthodologie ancrée de la nouvelle école de Chicago. Anne LAPERRIERE - La recherche-action. Arthur GÉLINAS - Entre l'histoire et la sociologie sur les rapports école/société. La perspective constructiviste. André PETITAT - Et pourquoi pas de la recherche sans hypothèse? L'alternative "existentielle- phénoménologique". Thérèse LAFERRIERE.

7,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 6, (1986). Numéro thématique. Restructuration scolaire. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 157 pages.

La répartition du pouvoir formel dans le système de l'enseignement public : de 1959 à la Loi 3. André BRASSARD - Contribution à l'étude de la pensée analogique dans le cadre de la résolution de problème. Estelle CHAMBERLAND et Colette DUFRESNE-TASSÉ - Revoir la recherche en éducation : cesser de prédire pour mieux comprendre. Jean-Marie VAN DER MAREN - La réforme scolaire au Québec : un compromis. Henry MILNER.

7,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 7, (1986). Numéro thématique. Arts-expressions en pédagogie. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 135 pages.

Pour une pédagogie de l'expression. Gisèle BARRET - Vers une compréhension de l'expression créative en activités dramatiques. Diane ST-JACQUES - Revue critique de la recherche en éducation artistique. Nancy LAMBERT - Plaisir de la musique pour un

enfant d'autrefois. André LEFEBVRE - Pour une définition de l'expression dramatique. Gisèle BARRET - Une recherche sur la formation des maîtres en expression - art dramatique. Gisèle BARRET et Georges LAFERRIERE - La recherche en arts-créativité-expressions à la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université de Montréal. Gisèle BARRET.

8,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 8, (1986). Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 237 pages.

Impact d'un congé de formation payé sur les études universitaires, le travail, la vie familiale et les loisirs de l'adulte. Colette DUFRESNE- TASSÉ, Maryse DELARUE, Emmanuelle MARX, Lucil ANÉ, André LEFEBVRE et Anne BÉLANGER - Voies de recherche et d'innovation en pédagogie ouverte. Jean-Claude HÉTU - La profession enseignante : multiplicité des identités professionnelles et culture commune. Claude LESSARD - L'évaluation de l'apprentissage : Éléments de politique. Serge RACINE.

13,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 9, (1988). Numéro thématique. Enjeux en éducation : Conception, rôle et devenir de l'école publique québécoise. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 144 pages.

L'école, une organisation mal définie et dispersée. André BRASSARD - L'école de demain : L'école d'une société qui a privatisé son destin. Antoine BABY - L'école un système frontière. Régent FORTIN - L'école un tout ou un fourre-tout. Ali HARAMEIN - L'école secondaire et ses images. Claude LESSARD - Le dilemme de l'école face à ses multiples missions. Monique MUS-PLOURDE.

10,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 10, (1988). Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 112 pages.

L'intégration de la micro-informatique à l'école québécoise. Avigdor FARINE et Christophe HOPPER - Méthode d'appréciation des aptitudes de l'handicapé cognitif. Jean GAUDREAU - Le devenir de l'école québécoise : quelques éléments de base. Claude LESSARD - Logo, la langue et la pensée. Michel THÉRIEN et Marie-Christine PARET.

8,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 11, (1989). Numéro thématique. Collectif sur la formation pratique des enseignants du secondaire. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 308 pages.

La formation des maîtres du secondaire et les questions qu'elle nous pose dans la conjoncture actuelle. Thérèse HAMEL - La psychologie et son impact dans la transformation du savoir enseignant au cours des années 1930'-1960'. M'Hammed MELLOUKI - Données descriptives et formation pratique des maîtres du secondaire à l'Université du Québec à Montréal. Monique LEBRUN - Vingt ans de microenseignement à l'Université

de Montréal. Marcienne LÉVESQUE - La formation à l'enseignement secondaire et collégial par simulation à l'Université Laval. Yves POISSON - La formation pratique des futurs maîtres et les Carnets du stagiaire. Renaud GAGNON et Marie-Marthe HÉBERT - Le développement de la pratique éducative dans le cadre du programme de Maîtrise en éducation (M.Ed.) en Abitibi-Témiscamingue. Gisèle MAHEUX et collaborateurs - Un enseignement à distance pour des enseignants du secondaire à l'Université du Québec à Rimouski. Yolande TREMBLAY - Le préceptorat : un stage hors l'école (Université de Montréal). Marcel BOISVERT - Résistance à l'école et au savoir scolaire ou difficulté à apprendre : défi pour les enseignants. Marcelle HARDY - L'efficacité des modèles en formation des maîtres. Marcienne LÉVESQUE et Thérèse DES LIERRES - Évaluation de l'habileté à observer la classe chez les étudiants-maîtres. Marcienne LÉVESQUE et Thérèse DES LIERRES - Évaluation des apprentissages des étudiants-maîtres pendant les stages en milieu scolaire. Colette GERVAIS - À l'Université de Sherbrooke : une formation psychopédagogique révisée axée sur l'interaction de différents savoirs. Hélène HENSLER et André BEAUCHESNE.

18,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 12, (1989). Numéro thématique. Orthopédagogies - Recherches d'aujourd'hui sur l'éducation d'élèves handicapés ou présentant des difficultés particulières d'apprentissage et d'adaptation. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 160 pages.

Déficience intellectuelle : accélération de l'acquisition de connaissances et de conduites. Jacques LANGEVIN - Que faisons-nous avec nos enfants hyperactifs? Propos et réflexions sur ces victimes de la vitesse. Jacques THIFFAULT - Les deux familles de Martin Kallikak ou le retour de l'hérédité dans les affaires de l'éducation. Jean GAUDREAU - Le programme de français et les enfants en difficulté d'apprentissage de la lecture. Nicole VAN GRUNDERBEECK - La peur de ne pas savoir la réponse : les difficultés d'apprentissage et d'enseignement des mathématiques. Gisèle LEMOYNE - Difficultés en langage écrit : approche diagnostique en Clinique d'orthopédagogie. Mia TOKER - Estime de soi et statut sociométrique d'un groupe d'élèves mésadaptés socio-affectifs intégrés en classe ordinaire. Michelle COMEAU et Georgette GOUPIL - Les activités d'apprentissage comme support aux étudiants en difficulté d'apprentissage dans l'acquisition de connaissances à l'aide de documents écrits. Louise BOURDAGES.

Épuisé

REPÈRES. Essais en éducation, no 13, (1991). Numéro spécial. Méthodes de la recherche en éducation : courants et débats. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 130 pages.

Définir l'objet des recherches pour l'éducation : des sciences de l'éducation au savoir pédagogique. Jean-Marie VAN der MAREN - Statistique, méthodes quantitatives et analyse des données. Jean-Guy BLAIS - L'approche quantitative dans les recherches en éducation. Jean-Marie VAN der MAREN.

12,00$

REPÈRES. Essais en éducation, no 14, (1991). Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 200 pages.

Étude exploratoire de la communication entre l'école et les parents d'enfants mésadaptés socio-affectifs. Michelle COMEAU, Georgette GOUPIL et Nicole PILON - L'auto-portrait culturel. Un outil de travail pour la formation des enseignants appelés à intervenir en milieu pluri-ethnique. Mona DITISHEIM - L'enseignement et l'apprentissage du français oral soutenu à l'école primaire. Gilles GAGNÉ, Louis LAURENCELLE, Roger LAZURE et Luc OSTIGUY - Un environnement pédagogique pour apprendre : Le modèle allostérique. A. GIORDAN et Yves GIRAULT - L'éducation multiculturelle au Canada : Politiques et pratiques. Claude LESSARD et Manuel CRESPO.

16,00$

ACTES DE COLLOQUE

Dans cette collection, paraissent les actes de colloques organisés par la Faculté et ses professeurs sur des sujets d'intérêt public ou plus spécialisés.

BIBEAU, Gilles et collaborateurs (réd.) (1985). La qualité en éducation : enjeux et perspectives. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 359 pages.

17,00$

BRASSARD, André (réd.) (1987). Le développement des champs d'application de l'administration : le cas de l'administration de l'éducation. Actes du colloque, tenu à Montréal le 15 mai 1986 lors du Congrès de l'ACFAS. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Actes de colloque no 001, Université de Montréal, 166 pages.

Épuisé

BRUNET, Luc (1986). Problématique de la recherche institutionnelle et comportement organisationnel. Compte rendu symposium. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 84 pages.

5,00$

FORTIN, Nicole et LECLERC, Jean-Marc (1988). Les mots. Le feed-back comme moyen de formation dans les stages. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation et du Service pédagogique de l'Université de Montréal. Guide de l'intervenant, 42 pages et vidéo.

Guide seulement - 5,00$
Guide et vidéo - 60,00$

GAGNÉ, Gilles et SAINT-JACQUES, Diane (réd.) (1988). Pour l'avancement de la recherche en éducation. Actes des Journées de la recherche et des grades supérieurs à la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université de Montréal tenues du 24 au 26 septembre 1986. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Actes de colloque no 003, Université de Montréal, 227 pages.

14,00$

NONNON, Pierre et VIVET, Martial (réd.), avec la collaboration de Paul d'Amour (1991). Robotique pédagogique. Actes du IIe Congrès international, tenu à Montréal du 22 au 24 août 1990. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Actes de colloque no 004, Université de Montréal, 362 pages.

27,00$

TARRAB, Elca; PLESSIS-BÉLAIR, Ginette et GIRAULT, Yves (réd.) (1991). Les communautés culturelles au Québec et la recherche en éducation. Actes du 1er colloque du Groupe d'intérêt sur le pluralisme ethnique en éducation (GIPEE), tenu les 2 et 3 mai 1990. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Actes de colloque no 005, Université de Montréal, 153 pages.
13,00$

VAN DER MAREN, Jean-Marie et collaborateurs (1985). Stratégie pour la pertinence sociale de la recherche en éducation. Enquête-symposium. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal (Société canadienne pour l'étude de l'éducation), 135 pages.
7,00$

VAN DER MAREN, Jean-Marie et PAINCHAUD, Gisèle (réd.) (1985). Objets et méthodologies en recherche qualitative. Actes du Colloque. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 68 pages.
Épuisé

VAN DER MAREN, Jean-Marie (réd.) (1987). L'interprétation des données dans la recherche qualitative. Actes du colloque de l'Association pour la recherche qualitative tenu à l'Université du Québec à Trois-Rivières le 31 octobre 1986. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Actes de colloque no 002, Université de Montréal, 132 pages.
9,00$

PRIX JEANNE-GRÉGOIRE

Le but de cette collection consiste à publier une fois par année, sous forme de volume, le texte de la meilleure thèse de doctorat soutenue à la Faculté des sciences de l'éducation. Les thèses sont évaluées par un jury sur la base de leur valeur scientifique.

DIONNE, Jean J. (1987). Vers un renouvellement de la formation et du perfectionnement des maîtres du primaire : Le problème de la didactique des mathématiques. Thèse de doctorat, 1986. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 353 pages.

19,00$

DUPONT, Chantal (1984). Reconstruction par les enfants de six à neuf ans de messages filmiques à structure ouverte ou fermée. Thèse de doctorat, 1983. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 340 pages.

15,00$

FORTIN, Jean-Louis (1982). L'impact de la formation universitaire sur les modes de pratique dentaire. Thèse de doctorat, 1982. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 387 pages.

18,00$

GOSSELIN, Pierre (1993). Un modèle de la dynamique du cours optimal d'arts plastiques au secondaire. Thèse de doctorat, 1991. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 298 pages.

24,00$

LAHAYE, Louise (1988). La scolarisation au Bénin : étude des cheminements scolaires et des rapports à la scolarisation des élèves du secondaire. Thèse de doctorat, 1987. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 382 pages.

22,00$

LALANDE, Jean-Pierre (1991). Élaboration d'un modèle théorique de l'apprentissage de l'orthographe lexicale au primaire. Thèse de doctorat, 1988. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 364 pages.

27,00$

MERROUNI, Mekki (1981). Le Collège musulman de Fès. Thèse de doctorat, 1981. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 390 pages.

18,00$

NANTAIS, Nicole (1991). La mini-entrevue : un outil d'évaluation de la compréhension mathématique au primaire. Thèse de doctorat, 1989. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 394 pages.

30,00$

TARDIF, Maurice (1993). Les fondements de l'éducation contemporaine et le conflit des rationalités. Thèse de doctorat, 1990. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 378 pages.

30,00$

TÉJI, Justin (1986). Gestion de la contraction financière dans les organisations universitaires. Thèse de doctorat, 1985. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 338 pages.

17,00$

WATTERS, Jean (1985). Fonctions et tâches des intervenants en formation par téléconférence. Thèse de doctorat, 1984. Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 205 pages.

Épuisé

COLLECTION SPÉCIALE

Cette collection, créée en 1990 à l'occasion du 25e anniversaire de la Faculté des sciences de l'éducation, sera consacrée particulièrement à l'historique de la Faculté et aux événements spéciaux la concernant.

CRÉPEAU, Gustave (1990). La Faculté des sciences de l'éducation de l'Université de Montréal - Profil historique. Collection spéciale HIS 001, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal, 194 pages.
12,00$

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION (1991). Échos du 25e anniversaire - 1965-1990 - Ouvrage collectif. Collection spéciale HIS 002, Publications de la Faculté des sciences de l'éducation, Université de Montréal.

Tome I - 196 pages **16,00$**

Le professionnalisme en éducation - Besoins actuels et futurs en formation - La place de la didactique dans la formation des maîtres - La reconnaissance des acquis en français écrit au collégial : enjeux et procédures.

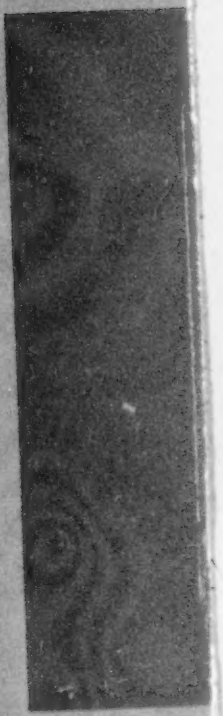
Tome II - 320 pages **25,00$**

Les programmes facultaires de formation initiale des enseignants - Les défis des années 90 - Pratique et formation pratique.

Tiré à part - 240 pages **19,00$**

Pratique et formation pratique.

COLLECTION RAPPORTS DE RECHERCHE



RR-041